Version:
December 1, 2022

DEMINT
Electronics Co., Ltd.

什么是电感?

Web: www.direct-token.com
Email: rfq@direct-token.com

德铭特电子（深圳）有限公司

大陆: 广东省深圳市南山区南山大道 1088 号南园枫叶大厦 17P
电话: +86 755 26055363

台湾: 台湾省新北市五股区中兴路一段 137 号
电话: +886 2981 0109 传真: +886 2988 7487

何谓电感

什么是电感?

被动组件设计用来抵御电流的变化。

电感器通常称为“交流电阻”。电感器最主要的特性是抵抗电流变化的能力和储存能量在其磁场。电流穿过电感会产生磁场。变化的磁场诱发电压并抑制电流产生。此抑制电流变化的属性被称为电感。

电感符号

一般来说，时间变化的电压 **v(t)**，电感量 **L**，和时间变化的电流 **i(t)** 之间的关系，可以微方公式如下：

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

当正弦交流电（AC）通过一个电感器，一个正弦电压被诱发。

磁芯类型

磁芯类型

环形磁芯 Toroidal Core

绕电感线于磁环上构建电感器像似甜甜圈的形状。许多磁芯材料可应用于环形磁芯，基本类型有四个：铁氧体，铁粉，合金，高通量和带绕磁芯。环形电感器的特点包括：自屏蔽（非磁性路径），能量转移效率，高耦合线圈和早期饱和。

“E” 磁芯

“E” 磁芯形状像一个“E”和在一个封闭磁路，像一个环形的核心时，配置为无间隙。有间隙的“E”磁芯有一个半开放磁路。有间隙的“E”磁芯的优势是可以获取更高的电感值，然后才能达到饱和。

磁铁心材料

磁铁心材料

陶瓷磁芯 Ceramic Cores

陶瓷是一种用于制做电感磁芯的常见的材料。它的主要功能是提供支撑线圈的结构。在有些设计上它的结构也便于引脚定位。陶瓷具有非常低的热膨胀系数，这使得在操作温度的范围内，电感有较好的感值稳定性。陶瓷并不具磁性，因此并不会增加导磁率，陶瓷线圈电感通常归类于空心线圈电感。陶瓷线圈电感大都使用在要求低感量，低磁芯损耗，高 Q 值（质量系数）的高频的产品。

铁氧体磁芯 Ferrite Core

铁氧磁体是一种磁性材料，由铁及其他元素的氧化物所构成的晶体结构。这种晶体结构是在高温及特定的方式，时间下将铁氧磁体材料烧结而得，其一般的组成为 xxFe2O4，其中 xx 代表一种或好几种金属，最为常见的金属组合为锰和锌 (MnZn) 及镍和锌 (NiZn)，这些金属都很容易被磁化。

Kool Mu® 磁芯 Kool Mu® Core

* Kool Mu® 是一种磁性材料，内部含有气隙。与其它磁性材料（例如铁氧体）比较，由在存在分布的气隙，磁芯可以存储较大的磁能。由于具有这样的特性，电感器可以流过更大的直流电流，而电感器仍未饱和。* Kool Mu® 材料主要包含镍和铁粉（每一种大约为 50%），有几种导磁率不同的产品。它的导磁率高于粉末铁磁材料，磁芯损耗也比较小。* Kool Mu® 是在高压下压制而成的，压力比压制粉末铁磁材料时的压力高得多。制造工艺包括一道退火工序，消除粉末金属中的应力，恢复所需要的磁性。于是，与粉末铁磁材料相比，烧结粉末状的铁粒需要更强的高温绝热性能。* Kool Mu® 在开关式电源中的性能很好。成本则比粉末铁磁材料高得多。

MPP 磁芯 MPP Core

MPP 是聚合物合金粉末的简称。这一种磁性材料具有按一定方式分布的气隙。与铁氧体等其他磁性材料相比，由于这种材料存在分布的气隙，磁芯可以存储较大的磁通量。由于具有这种特性，流过电感器的直流电流可以比较大，而电感器仍不会饱和。它的基本成份是镍、铁及钼。比例为镍占 80%，钼占 2%～3%，其余为铁。制造工艺中有一个步骤是退火，在 Kool Mu® 的定义中已经讨论过。 MPP 能存储较大数量的能量，导磁率高于 Kool Mu®。有十多种导磁率的磁芯供选择。由于磁芯的特性，电感器的性能较好，适合用于开关式电源。由于磁芯能够存储较大的能量，流过电感器直流电流可以更大，而磁芯仍不会饱和。MPP 磁芯的成本比尺寸相同的 Kool Mu® 磁芯、粉末磁芯及大多数铁氧体磁芯的成本高很多。

粉状铁磁芯 Powdered iron Core

粉状铁是一种磁性材料，其内分布着许多气隙，与其他之磁性材料如铁氧磁体比较起来，此分散的气隙使得铁芯能储存较高的磁通量，这种特性使得在电感达饱和之前得以允许通过较高的直流电流。粉状铁磁芯几乎以 100% 铁制造。铁粒子间相互绝缘，混入黏结剂（如酚醛树脂或环氧树脂）再压制成最后的磁芯形状，最后再以烘烤制程固化。其他一些粉状铁铁芯的特性包括：一般它是最经济的替代品且它的导磁率一般比铁氧磁体有较稳定的温度系数。

叠片磁芯 Laminated Cores

把片状磁性材料即铁芯片一层一层叠起来构成的铁芯。铁芯片可采用不同材料和不同厚度的产品。有些铁芯片的结晶被制作成一定的方向，目的是降低磁芯损耗以及提高导磁率。每个铁芯片的表面是绝缘的，通常是一层氧化物。叠片磁芯用于某些电感器，但更多是用于各种变压器。

电气规格

电气规格

电感量 Inductance

此电路组件的特性，能抑制流经组件电流的改变。电感的电感量会受磁芯的材质、磁芯的形状及尺寸、绕线的圈数及线圈的形状所影响。电感器的电感量通常用微亨（μH）来表示。下列的表格可以用来将电感值的单位换算成微亨。因此，

1 henry (H) = 10^6 μH
1 millihenry (mH) = 10^3 μH
1 microhenry (μH) = 1 μH
1 nanohenry (nH) = 10^{-3} μH

直流阻抗 DCR (DC Resistance)

电感线圈在非交流电下所测量的电阻值。在电感设计中，直流阻抗愈小愈好，其测量单位为欧姆，通常标注其最大值。

饱和电流 Saturation Current

在电感器中流过、引起电感量下降特定量的直流偏置电流。电感量下降的值是从直流电流为零时的电感量开始计算。通常定义的电感值下降百分比有 10% 及 20%。在储存能量的应用中，铁氧体磁芯的电感量下降规定为 10% 及粉末磁芯的电感量下降规定为 20%。
因此直流偏压电流而致电感值下降的因素与磁芯的磁性有关。磁芯和磁芯周围的空间只能存储一定量的磁能。超出最大的磁通量密度点后，磁芯的导磁率会降低。因此，电感值会因而下降。空心电感并不存在磁芯饱和的问题

增量电流 Incremental Current

指流经电感的直流偏压电流，与没有直流偏压电流的电感量相比，这个电流会引起电感量下降5%。这个电流强度说明电感值在持续增加的直流偏压下将急速地下降。这个结果适用于铁氧体磁芯，但不适用于粉状磁芯。粉状磁芯具有“软性”的饱和特性，意思是指在较高的直流偏压下，其电感量的下降较铁氧磁芯来的缓和。同时，电感值下降的速率亦和铁芯的形状有关。

额定电流 Rated Current

允许能通过电感的连续直流电流强度。是指电感器处在额定最高环境温度的环境中，电感器温升最高时，可以连续流过的直流电流的大小。额定电流与电感值由低的直流电阻以降低绕组的功耗的能力有关。它也与电感器把绕组的功耗散发出去的能力有关。
因此，降低直流电阻或者增大电感器的尺寸可以提高额定电流。对于低频电流波形，可以用有效值电流代替额定直流电流。额定电流与电感器的磁性无关。

导磁率 Permeability (Core)

磁芯的导磁率是指令磁芯具有集中磁通线的能力的特性。磁芯的材质及磁芯的形状会影响磁芯的“有效导磁率”。对一个已知的磁芯形状、尺寸及材质和特定的绕组，具较高导磁率的磁性材质与较低导磁率的材质比较起来，会有较高的电感值。

自谐频率 SRF (Self-Resonant Frequency)

电感器中的分布电容与电感形成谐振时的频率。此时电感的感抗等于电容的容抗，并且互相抵消。电感在自谐频率点时，显现出具高阻抗值的纯电阻状态。

分布电容是由于各层线圈一层层叠着并且是绕在磁芯上而形成的。此电容是并联于电感。当频率高于自谐频率时，此并联的容抗会主导组件的特性。

而且，此电感的质量系数于自谐频率时会为零，因为此时的感抗等于零。自谐频率以 MHz 标示，且在产品的数据表内以最小值登载。

分布电容值 Distributed Capacitance

在电感的结构中，每一圈的导线或导体都起电容器极板的作用。其每圈结合起来的效果，有如单一的电容值，称之分布电容值。分布电容是与电感器并联着的。电感和分布电容的并联电路会在某个频率产生谐振，这个频率称作自谐频率（SRF）。一个电感器的分布电容越小，它的自谐振频率就越高；相反，如果分布电容越大，它的自振频率就越低。

品质系数 Q

电感的质量系数是量测电感相对损耗的指标。这 Q 值被称为“品质系数”，它的定义为感抗 (XL) 对有效电阻 (Re) 之比，如下所示：

$$Q = \{XL\}/\{Re\} = \{2\pi fL\}/\{Re\}$$

因为感抗及有效电阻都相关于频率，当要确定质量系数时需指定一个测试频率。在低频时，感抗的增高一般随频率的增加速率比有效电阻来的大，在高频时掉的也快。故质量系数对频率的关系形成钟型的曲线。有效电阻主要由绕组的直流电阻、铁芯损耗及集肤效应所造成。由上列的公式可看出在自谐频率时的质量系数为零，因为此时的电感值为零。

阻抗 Impedance

电感的阻抗值是指其在电流下所有的阻抗的总和，包含了交流及直流的部份，直流部份的阻抗值仅仅是绕线的直流电阻，交流部份的阻抗值则包括电感的电抗。

下列的方程式用来计算理想电感（没有能量损失）在正弦波交流讯号下的电抗:

$$Z = XL = 2\pi fL$$

L 的单位为亨利而 f 的单位为赫兹，此方程式说明较高的阻抗值可由较高的电感值或在较高的频率下得到，此外，集肤效应及铁损亦会增加电感的阻抗值。

操作温度范围 Operating temperature range

元组件可以持续操作的整体环境温度范围，操作温度范围不同于储存温度，因操作温度范围包括元组件本身的热功耗，热功耗相当于铜损，公式计算如下：

$$功耗 = (DCR)\,(I^2_{dc})$$

$$最大操作温度 = 储存温度 - 自我温升$$

功耗导致元组件自身温度高于环境温度。因此，最大的操作温度范围应低于最大的储存温度。

电感器类型

电感器类型

线绕电感

- 线轴式电感线圈
- 环形电感线圈

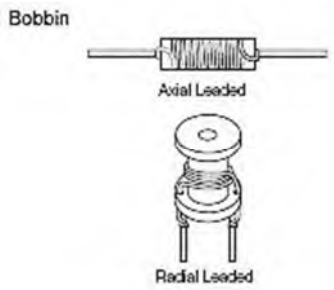
多层铁氧体电感

- 磁珠
- 电感器

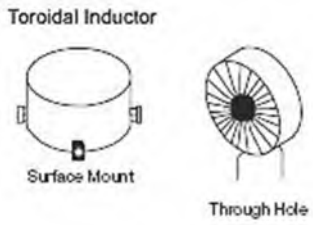
多层陶瓷电感

薄膜电感

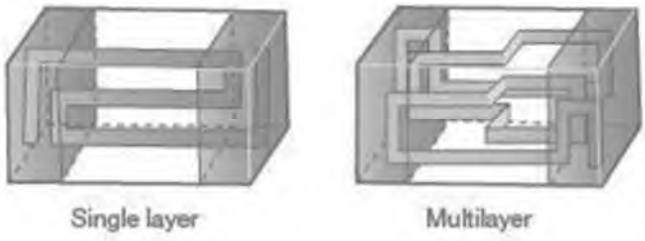
激光切割电感



Single layer & Multilayer Inductor



Toroidal Inductor



Bobbin Inductor

性能因素

性能的影响因素

铜损 Copper Loss

电流流经线圈所产生的能量损失，此能量损失等于电流大小的平方乘上线圈的电阻 (I2R)，这些能量损失将转换成热能。

磁芯损耗 Core Losses

磁芯损耗是由于磁芯材料中的交变磁场引起的。磁芯损耗与频率及磁通量变化幅度有关。总磁芯损耗包含三个分量：磁滞损耗，涡流损耗，以及残余损耗。对于不同材料，这三个分量的差别很大。大功率，高频开关稳压器和 RF（高频）的设计要求细心选择磁芯，尽量降低磁芯损耗，以便电感器具有优异的性能。

涡流损耗 Eddy Current Losses

在电感器的磁芯及绕组中都存在涡流损耗。绕组（或者导体）中的涡流损耗有两种类型：邻近效应和趋肤效应引起的涡流损耗。至于磁芯损耗，在磁场中，磁力线四周的电场是由交变磁力线所产生的，如果磁芯材料存在导电性，就会产生涡流。涡流在一个垂直于磁力线的平面中流动，由于这个现象而造成损耗。

集肤效应 Skin Effect

集肤效应是指交流电流较倾向于在导体的表面传导而不是在导体的整个横截面上均匀地流动。此现象会造成导体的电阻提高。

导体中的电流产生的磁场会在导体的中间产生涡流，它与导体中间原来的电流方向是相反的。随着频率的升高，主电流被迫靠近导体的表面流动。

绞合漆包铜线 Litz Wire

用互相绝缘的若干股导线编排在一起，或捆在一起的多股导线，每一根导线在整束线横截面上的位置都尽可能固定如同一体。每根导线的磁交链值及电阻值都是平均的，致使电流能平均的分流至每根导线。换句话说，绞合线比实芯线有较低的交流损耗，更适用于高频产品。

居里温度 Curie Temperature

铁氧体磁芯失去磁性的温度。当温度接近居里温度时，磁芯的导磁率剧急上升，引起电感量增加。但是到了居里温度，导磁率下降到接近 1，导致电感量急遽下降。居里点是指导磁率下降到室温导磁率的 10% 的温度。

相关电气特性

相关电气特性

直流阻抗 DCR

电感线圈在非交流电下所测量的电阻值。在电感设计中，直流阻抗愈小愈好，其量测单位为欧姆，通常标注其最大值。

额定电流 Rated Current

在一个给定的设计，因为电感量（匝线）增加，额定电流下降。如果磁芯的磁导率是增加，绕线组的圈数可以减少，额定电流将上升。

增量电流 Incremental Current

在一个给定的设计，因为电感量（匝线）上升，增量电流下降。
如果磁芯的磁导率是增加，绕线组的圈数可以减少，增量电流可能会增加或减少。*
* 如果增加磁导率在磁芯饱和点下降，实际增量电流可以下降。

自谐频率 SRF

电感器中的分布电容与电感形成谐振时的频率。此时电感的感抗等于电容的容抗，并且互相抵消。电感在自谐频率点时，显现出具高阻抗值的纯电阻状态。分布电容是由于各层线圈一层层叠着并且是绕在磁心上而形成的。此电容是并联于电感。当频率高于自谐频率时，此并联之容抗会主导组件的特性。而且，此电感之质量系数于自谐频率时会为零，因此时之感抗等于零。自谐频率以 MHz 标示，且在产品的数据表内以最小值登载。

品质系数 “Q”

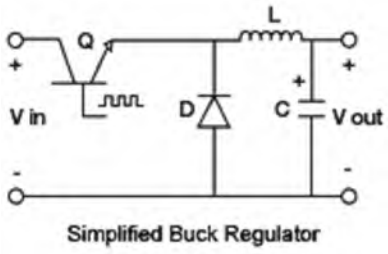
在一个给定的设计，因为电感量（匝线）上升，Q 值下降。
如果磁芯的磁导率增加，绕线组的圈数可以减少，增量电流可能会增加或减少。*
较高的 Q 值通常表示一个电感有更多的选择性滤波器。应用于的射频电路的电感器通常具有高 Q 值的，使他们有更多的频率选择性。
较低的 Q 值通常表示较广泛的频率衰减。铁氧体磁珠具有低 Q 值，并因此被视为宽带滤波器。
* 如果增加磁导率会导致阻抗增加，Q 值降低于某一频率点。

电感器应用

电感器的应用

降压稳压器（直流-直流）Buck Regulator (DC-DC)

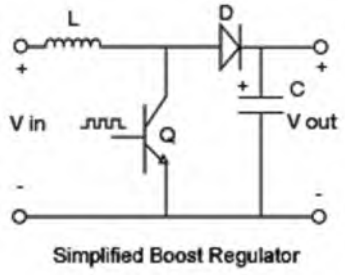
基本的 DC-DC 转换器电路，是将未经稳压的输入电压，在输出端产生数值较低、稳压了的输出电压。这个输出电压，是通过一个串联的开关（晶体管）对输入电压进行限幅而将形成的脉冲，加到起平均作用的电感器和电容器的电路上。



简易型降压稳压器

升压稳压器（直流-直流）Boost Regulator (DC-DC)

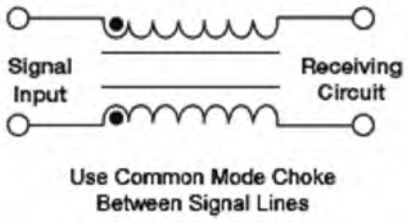
基本的 DC-DC 开关稳压器电路，是将未经稳压的输入电压，转换成一个数值较高、已经稳压的输出电压。这个较高的输出电压，是通过输入端的一个电感对输入电压，进行充能并经由一个并联的开关（晶体管）的开和关转换后输出。



简易型升压稳压器

Common-Mode Choke

用于共模噪声衰减或电子干扰，普遍常见于电气线路有关于接地。共模扼流圈其实是一个变压器配置，常见的噪音自消的变压器。



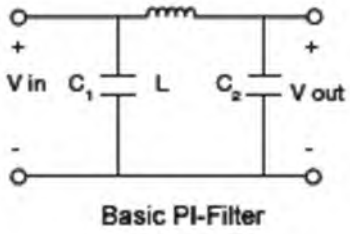
Use Common Mode Choke Between Signal Lines

滤波器 Filter

一种电路者装置，它的作用是在一个给定的频率上，或者在一定范围的频率内控制电能。不同种类的被动组件，常被用来建构不同的滤波器，这些被动组件包含电阻，电容，及电感。

PI-滤波器 PI-Filter

由两个并联起来的电容器和一个串联着的电感器所组成的滤波器。这种滤波器在 DC-DC 转换器中通常用于滤除脉动电流和脉动电压。



基本型 PI-滤波器

输入线滤波器 Input Line Filter

连接在一个电路输入端或者一个组合电路输入端的电源滤波器。它的作用是把来自电源线的噪声清除掉。滤波器是设计成清除某一个频带中的噪声。 低通滤波器是一种典型的输入滤波器，它让低频信号通过，例如直流电源；但是把高频信号（其中的主要成份是噪声）衰减掉。 带通或低通滤波器通常由电感及电容搭配而成。

匹配阻抗 Matched Impedance

指一个存在的条件，当调整两个耦合电路使得其中电路的输出阻抗与另一电路的输入阻抗相等时称之。当他们的连接阻抗相等时，两电路间的能量损失最低。

电磁波干扰 EMI

EMI 是 Electromagnetic Interference （电磁波干扰）之缩写，不论它是什么形式，都是不需要的电能，EMI 通常与 “NOISE” （噪声） 一词可以互相代替使用。

噪声 Noise

指在电路中与所要之讯号无关之多余电能。噪声的来源通常由一些开关电路所造成。常见的噪声源为开关式稳压器及时钟信号，例如数字电路中的时钟信号。