

## EMC 产品知识-电感之电流参数及损耗深度解析

### 1. 前言

2021 年全球电感器市场销售额达到了 41 亿美元，预计 2028 年将达到 62 亿美元，年复合增长率（CAGR）为 5.2%（2022-2028）。地区层面来看，中国市场在过去几年变化较快，随着中国通讯技术的快速更迭以及物联网、智慧城市等相关产业大规模建设，中国电感器市场规模快速发展，增速约高于全球增速，若以 10% 的增速测算，2021 年，我国电感器市场规模约达 129 亿元，2026 年约突破 200 亿元。

电感电流应该是电感最重要的参数了，电路设计必然会关注这个参数。然而，各家标注电流方式均不相同，有的厂家就只有一个额定电流，有的厂家会标两个，一个是饱和电流，一个是温升电流，还有的更为详细，会标电流的典型值和最大值，如何理解这些参数的差别？电流的典型值为什么比最大值大？电感的损耗包含那些？如何进行计算和评估等等，本文将带着这些疑问，一一进行深度的解析。

### 2. 温升电流 $I_{rms}$

温升电流  $I_{rms}$ ，一般指电感自我温升温度不超过 40°C 时的电流。

如下图所示，为南柯电子，0402 尺寸一体成型电感的参数，可以看到，电感的工作温度范围是 -40 到 +125°C，是包含自我温升的，所以，当电路工作环境温度小于 125-40=85°C 时，只要我们电感电流不超过温升电流（此时温升为 40 度，加上环境温度，正好 125 度），那么就没有问题，当然了，我们会留一些余量。



#### 电性特性

#### Electrical Properties

型号 Part Mo.	电感 Inductance μH		温升电流 Rated Current		直流电阻 DC Resistance DCRmax (mΩ)	饱和电流 Saturation Current		耐压 Withstanding Volt. ≦1mA/3S (V) <sub>max</sub>	卷盘数量 Taping Reel Qty. pcs
			$I_R$ typ 40°C (A)	$I_R$ max 40°C (A)		$I_{sat}$ typ (A)	$I_{sat}$ max (A)		
SPI19-0402-R10M	0.10	±20%	15.60	13.00	4.00	28.00	24.00	80.00	3,000
SPI19-0402-R15M	0.15	±20%	13.00	12.00	6.50	17.00	15.00		3,000
SPI19-0402-R22M	0.22	±20%	12.00	10.00	7.80	16.00	13.00		3,000
SPI19-0402-R33M	0.33	±20%	10.00	9.00	10.50	13.00	11.00		3,000
SPI19-0402-R47M	0.47	±20%	9.00	8.00	12.50	12.00	10.50		3,000
SPI19-0402-R56M	0.56	±20%	7.90	7.00	16.00	11.00	9.00		3,000
SPI19-0402-R68M	0.68	±20%	7.60	6.50	18.50	9.00	8.00		3,000
SPI19-0402-1R0M	1.00	±20%	7.00	6.00	24.00	8.00	7.00		3,000
SPI19-0402-1R2M	1.20	±20%	6.00	5.00	25.80	6.50	5.50		3,000

#### 测试状态

#### Test Condition

☆ 电感测试条件为 100 kHz/ 1.0V

Inductance measure condition at 100 kHz/ 1.0V

☆ 工作温度: -40°C ~ +125°C

Operating Temperature: -40°C ~ +125°C

☆ 饱和电流: 电感值下降其初始值的30%时所加载的实际直流电流值

Saturation Current: The actual value of DC current when the inductance drop 30% of initial value

估计有人会问，如果环境温度小于 85 度，那是不是就可以超过额定温升电流  $I_{rms}$  使用呢？

理论上超一点没有问题，但是不建议，因为会有新的问题，超多少不会出现问题呢？没有一个定值。并且，因为超过  $I_{rms}$  之后，温升随电流增加上升很快的，另外，电感的线径也决定了不能无限增加电流；

如下图 1 的曲线是南柯电子电感的温升电流和饱和电流曲线，可以看到，曲线类似是指数曲线，在温升达到 40 度后，电流只要增加一点点，温度就升高很多。所以，建议不管环境温度比 85°C 低多少，都不要使电感电流超过温升电流  $I_{rms}$ ，这样就万无一失了。

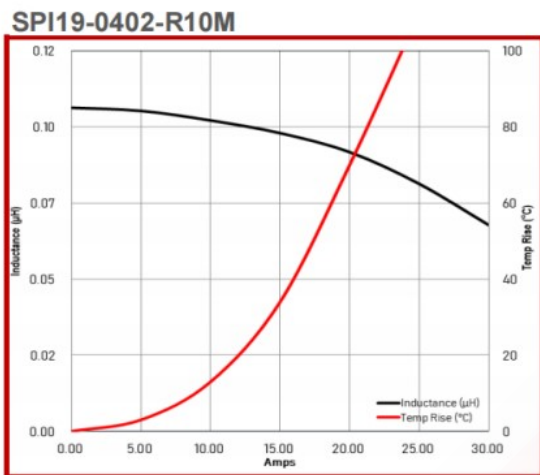


图 1 饱和电流 vs 温升电流曲线

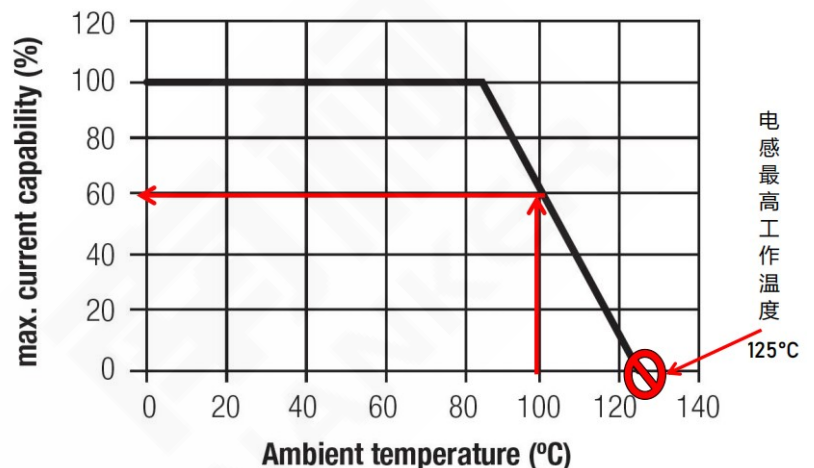


图 2 温升电流降额曲线

同样也有一个问题，这个温升电流是有效值还是瞬间值呢？答案是有效值。温升电流，说的是使温度上升到一定值的电流大小，这不就是有效值的定义么，其符号  $I_{rms}$  也说明了这一点。

工程师在实际设计电路时，还会遇到一种特殊情况就是，环境温度高于 85°C，那这个时候额定温升电流  $I_{rms}$  就不能满额使用，只能降额使用，具体降多少，可以参考图 2 所示的曲线，例如如果环境温度是 100°C，这时额定温升电流  $I_{rms}$  需要降额 60%来进行设计；

### 3. 饱和电流 $I_{sat}$

饱和电流  $I_{sat}$ ，一般是指电感值相对于初始值衰减 30% (有些厂家是 10%，40%) 的偏置电流。

饱和电流为什么会存在呢？电感一般都含有磁芯，特别是功率电感，磁芯是存在磁饱和的。什么是磁饱和呢？由于磁芯材料自身的特性，其通过的磁通量是不可以无限增大的。通过一定体积导磁材料的磁通量大到一定数量将不再增加，不管你再怎么增加电流或匝数，就达到磁饱和了。当电流已经使磁芯饱和，再增加电流，也基本不会再使磁通量增加，或者说增加很少，等同于空心电感的增量，因为饱和之后磁芯失去作用，等同于空心电感。电流增大，而磁通量不

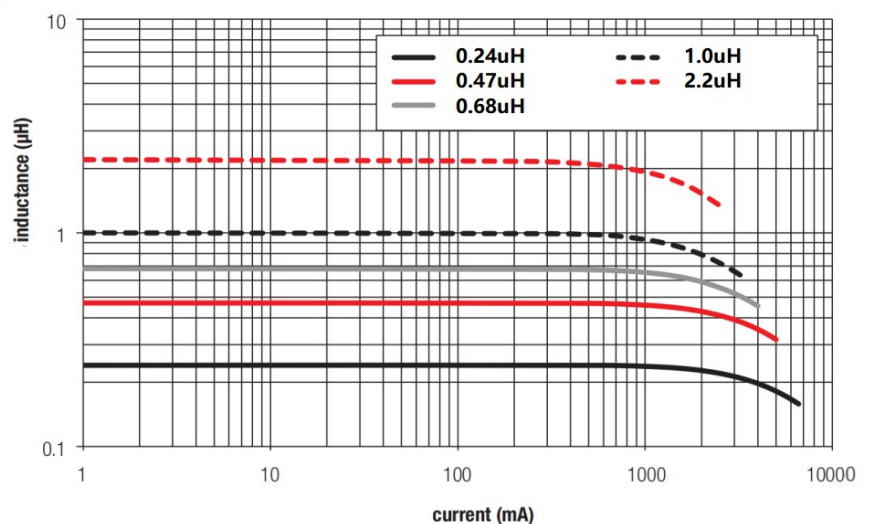


图 3 感值与电流曲线

增加，那么电感阻碍电流的作用就没有了，也就是说电感器失去了作用，这时的磁芯完全饱和。

当然我们并不会等到电感完全饱和。事实上，在电流比较小的时候，单位电流产生的磁通量与电流成正比，这个意思就说磁芯磁导率为常数。而随着电流慢慢增大，单位电流的增加产生的磁通量的增量是下降的，也就是说随着电流的增加磁导率是慢慢下降的，因此，电感的感量也下降。所以就有了前面的定义，电感量衰减到 30%（有些厂家是 10%，40%），我们就说电感饱和了。

还有个问题，饱和电流  $I_{sat}$  到底是有效值还是瞬间值呢？饱和电流可以理解为瞬间值，因为电感的饱和原因是因为磁芯饱和，只要电流达到一定值，就会使磁芯磁饱和，而不论你是什么时候达到。所以在电路设计中，一定不要让电感的最大电流值（瞬间值）超过其饱和电流。

无论是温升电流  $I_{rms}$ ，还是饱和电流  $I_{sat}$ ，为什么其典型值 TYP 大余最大值 MAX 呢？这是因为电感有公差，通常是  $\pm 20\%$ ，TYP 值电流对应的是电感值在标称值时候的，而 MAX 值电流对应的是  $+20\%$  电感值的时候，由于电感值越大，对应的电流值越小，所以 MAX 值小于 TYP 值，实际选型时，还是要以参考 MAX 为准。

#### 4. 损耗 $P_{core} + P_{cu}$

电感的损耗主要由磁芯损耗和线圈损耗组成，即我们通常所讲的磁损  $P_{core}$  和铜损  $P_{cu}$ 。

磁损  $P_{core}$  主要包括磁滞损耗和涡流损耗，但对于粉芯类的磁芯，由于磁材料间的绝缘阻抗很大，涡流损耗几乎可以忽略。

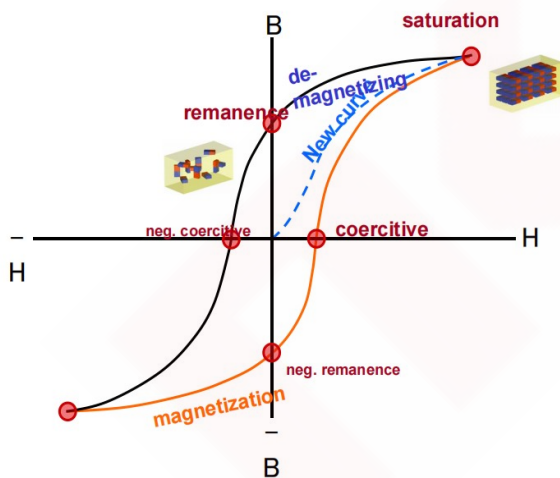


图 4 磁滞损耗

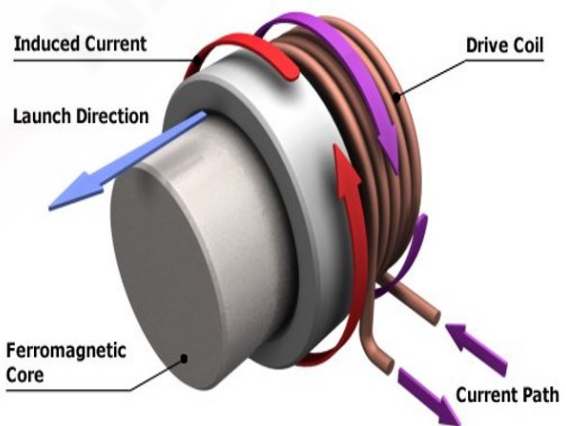


图 5 涡流损耗

磁滞损耗与频率和交流磁通密度  $\Delta B$  有关，与其直流工作点磁通密度  $B_{dc}$  关系不大，例如 Micrometal 公司提供的铁粉芯磁芯损耗计算经验公式如下：

$$P_{core\_loss}(B) = \frac{f}{\frac{a}{B^3} + \frac{b}{B^{2.3}} + \frac{c}{B^{1.65}}} + df^2 B^2$$

其中  $a, b, c, d$  为磁芯损耗参数（厂家提供），其值依铁芯材料而异， $f$  为开关频率， $B$ （单位为 Gauss）为一个开关周期内交流磁通密度的峰值，它是单个开关周期内磁通密度变化量的一般（ $\Delta B = 2 * B$ ），当  $B$  值确定之后，电感的磁芯损耗也就确定了。

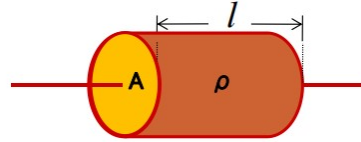
铜损  $P_{cu}$  是由电流在导线上产生的，通常流过电感的电流包括工频或者直流成分的低频电流和开关频率的高频电流，低频电流产生的损耗，我们一般称为直流损耗，即 DC 损耗，主要取决于电感的  $R_{DC}$ ，高频电流产生的损耗，我们一般称为交流损耗，即 AC 损耗，主要取决于绕线的结构及导线的形状。

如何减少 DC 损耗，从下述计算公式可以找到我们的答案。

$$R_{DC} = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

$$\rho_{copper} = 1,786 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

$$P_{cu/DC} = I_{DC}^2 \cdot R_{DC}$$



$\rho$  = 电阻率，与材料相关  
 $A$  = 导线截面积  
 $l$  = 导线长度

要降低 DC 损耗，最为重要的是要降低  $R_{DC}$ ，这样就需  
 要增加导线的截面积，减少导线的长度，选择更好的导体；  
 经常会听到厂家说，扁平铜线绕制的电感好于圆形铜线绕制  
 的电感，其实主要也是因为，对于相同结构的磁芯，扁平线  
 的截面积，比圆形铜线大，所以通过的电流会更大， $R_{DC}$  小，  
 DC 损耗会更小。

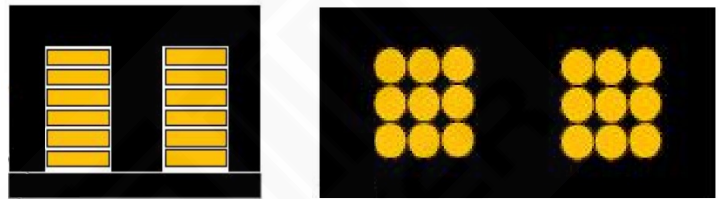


图 6 扁平铜线与圆形铜线截面积对比

另外，需要补充说明的是， $R_{DC}$  超过室温后，也会发  
 生变化的，如右图 7 所示，以铜线为例， $R_{DC}$  随着温度的变  
 化具体变化值，可以参考具体公式及曲线图来进行评估和  
 计算；

$$R_{\Delta T} = R_{25^{\circ}C} \cdot [1 + (\alpha \cdot \Delta T)]$$

$$\alpha_{copper} = 0.0039$$

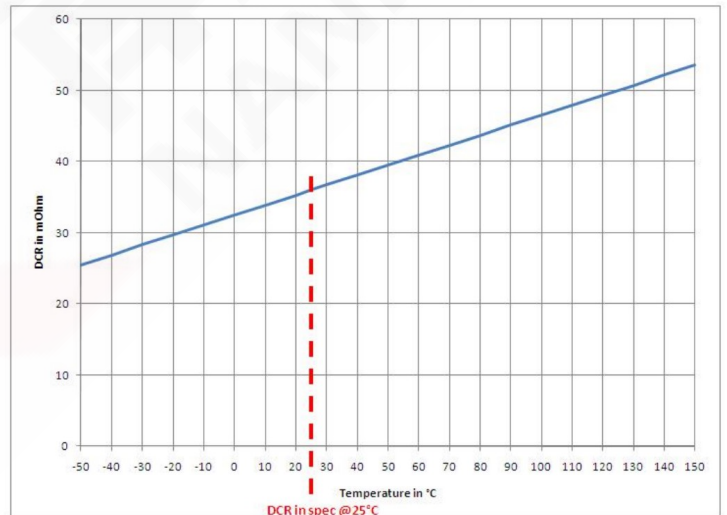


图 7  $R_{DC}$  随温度变化曲线

那又如何降低 AC 损耗呢？我们需要优先了解清楚什  
 么是趋肤效应，什么是邻近效应。

趋肤效应原理：当导体中有交流电或者交变电磁场时，  
 导体内部的电流分布不均匀，电流集中在导体的‘皮肤’部分，  
 也就是说电流集中在导体外表的薄层，越靠近导体表面，  
 电流密度越大，导体内部实际上电流较小。结果使导体的  
 电阻增加，使它的损耗功率也增加。这一现象称为趋肤效  
 应 (skin effect)。

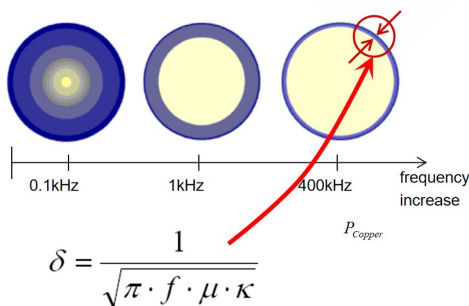


图 7 趋肤效应图



图 8 邻近效应图

如图 7 所示，蓝色部分：为 AC 电流驱动的部分，称作：肌肤深度；黄色部分：为 AC 电流没有驱动的部分；当频率越高，  
 $R_{AC}$  越大，这样铜损也就越大；

SHENZHEN NANKER ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD  
Plant 405, Rongchengda Industrial Park, No.49 Dabao Road,  
Bao'an Shenzhen  
Tel: (+86) 755 29417105 / (+86) 15012887506  
Fax: (+86) 755 29417105  
www.sznktech.com



相邻导线流过高频电流时，由于磁电作用使电流偏向一边的特性，称为“邻近效应”。如相邻二导线 A、B 流过相反电流  $I_A$  和  $I_B$  时，B 导线在  $I_A$  产生的磁场作用下，使电流  $I_B$  在 B 导线中靠近 A 导线的表面处流动，而 A 导线则在  $I_B$  产生的磁场作用下，使电流  $I_A$  在 A 导线中沿靠近 B 导线的表面处流动。由于电流只集中在导体一小块区域，相当于增加了电阻  $R_{AC}$ ，又如当一些导线被缠绕成一层或几层线匝时，磁动势随绕组的层数线性增加，产生涡流，使电流集中在绕组交界面间流动，这种现象就是邻近效应。邻近效应随绕组层数增加而呈指数规律增加。因此，邻近效应影响远比趋肤效应影响大，减弱邻近效应比减弱趋肤效应作用大。

由于磁动势最大的地方，邻近效应最明显。如果能减小最大磁动势，就能相应减小邻近效应。所以合理布置原副边绕组，就能减小最大磁动势，从而减小邻近效应的影响。

## 5. 总结

- a. 电感的额定电流，包含饱和电流和温升电流；
- b. 电感的最大电流瞬间值不能超过饱和电流，一般情况下，需要留 20%-30%左右的余量；
- c. 实际应用的电流有效值也不能超过温升电流，余量根据行业应用进行预留；
- d. 电感的选型，不能简单参考厂家提供的基本参数，需要结合对比其饱和电流曲线和温升电流曲线，更深入分析，还需要结合实际电路应用，考虑频率，磁芯，铜线类型及绕线的结构等因素对于损耗的影响；