

拓展电感的规格与特性对开关电源电路影响的分析

The analysis of the influence of the characteristics on the power circuit of the switching power supply

吴康

摘要: 本文将基于电感在内的磁性元器件的规格与特性对电源电路和降压转换器的输出电流的影响及关系作研讨, 并重点对电感种类及功率电感构建与磁特性作分析说明, 之后对其新趋势亦作介绍。

关键词: 功率电感, 磁路, 直流叠加, 降压转换器

Abstract: This article based on the specifications of the inductance, magnetic components and characteristics of the power supply circuit and step-down converter output current and the relationship between the influence of the discussion, and focusing on inductance type and power inductors 构 built with magnetic analysis shows that after its new trend is also introduced.

Keywords: power inductance, magnetic circuit, Dc stack, step-down transformer

如今开关电源是必须项目, 而电感是构建开关电源的重要元器件之一, 因它是电源电路特性有重要影响的元件。为此掌握包括电感在内的磁性元器件的规格与特性对电源电路设计有怎样的影响将是工程师研讨的新问题。

值此本文将基于电感在内的磁性元器件的规格与特性前提下对开关电源电路和降压转换器的输出电流有怎样的影响及关系作研讨, 并重点对电感种类及功率电感构建与磁特性作分析说明。

要阐明上述问题时首先应掌握其切入点, 那就是要对电感的直流叠加容许电流和温度上升容许电流与降压转换器的输出电流有何影响及关系作分析。据此先应对电源用的电感种类与构建磁路及电感直流叠加容许电流理念作分析说明。

1 电源用的电感种类与构建磁特性及电感直流叠加容许电流新理念

1.1 电源用的电感种类与构建的磁特性

电感有几种, 其电感的种类、结构都非常多样。在此仅以“功率电感”为例重点作解析。功率电感有卷线开磁路型、卷线闭磁路型、叠层型。它们的特征汇总如下表 1 所示。“×”理解为“说不上好”的程度。其中, 因开磁路型的 DC 损耗 R_{dc} 较大, 如今不怎么用于电源应用, 故表

1 仅就闭磁路型与叠层型特征示意进行介绍。

表 1 为功率电感仅就闭磁路型与叠层型特征示意

类型	屏蔽	叠加特性	R_{dc}	小型化	尺寸
绕线开磁路	无	⊙	×	×	⊙
绕线闭磁路	套芯	○	○	○	△
	磁性树脂	○	○	○	○
叠层	叠层体	△	⊙	○	⊙

表 1 中的绕线闭磁路型电感有是“鼓套结构”与“非屏蔽结构”两种。其鼓套结构是在铁芯上绕线, 是带套管的结构, 具有气隙, 而铁芯材料铁氧体具有磁通饱和点。气隙用来漏磁, 提高饱和点, 调整直流叠加特性。非屏蔽结构是最近流行的结构, 在铁芯上绕线, 将混有铁氧体粉或铁粉的树脂涂覆在周围用以制作闭磁路。但是, 因同样的原因需要气隙。在这种情况下, 包围磁性体的树脂起到气隙的作用。

* 那为什么非屏蔽结构会近通用并流行呢? 因非屏蔽结构具有几个优点。如名称所示不使用套管, 因此只要铁芯尺寸相同即可小型化; 另外一个重要优点是, 饱和特性比鼓套型要缓和。众所周知, 铁氧体的饱和特性比较急剧。一旦超过饱和点, 电感值急剧下降, 因此在电源设计时它应是电感相关的注意重点。而鼓套结构设置的气隙带来的饱和点是一点, 一旦超过这点, 就变为依赖铁氧体材料的

饱和特性。也就是说，基本上是剧烈的。而非屏蔽结构，到混合于树脂的磁性体（粉）的间隙多样，因此饱和点混杂，使饱和较为缓和平稳。

* 非屏蔽结构具有小型、饱和特性平稳的优势。的确如此，但也有弱点，或者说是应该注意的要点。简单地说，没有套管，仅通过磁性体树脂涂覆卷线，因此可能受外部压力或应力影响而开裂。针对这一点，产品应采取对策，将以往的树脂变更为硬度更高的树脂，从而提高了强度。此外，树脂与铁芯是不同材料的组合，线膨胀系数不同，因此可能发生开裂。针对这个问题，通过使树脂的线膨胀系数尽量接近铁氧体来解决。事实上采取这些对策大幅提高了强度，但不同制造商的提高程度是有差异的。

* 改进与发展叠层型功率电感 表 1 中有叠层型功率电感。实际上，叠层结构的功率电感在过去被认为是不可能的产品。稍微流过一点电流就会瞬间饱和，还有发热的问题。此外，获得大电感值也曾经是难题。为此需要改进与发展才能适用于电源电路。

那如何改进与发展叠层型功率电感特性（见图 1 所示）以适用于电源电路呢？为了改善叠加特性，通过采取控制磁感线的环绕方向，使磁感线不集中的结构，以及制作气隙结构等来实现。此外，针对发热，实施加厚内部电极，降低电阻值等诸多改善，使叠层型电感可用于电源电路。

其特征是，与卷线结构相比可进一步小型化（见表 1 中最右下端◎所示）。而其电感值可达数 μH 左右，因此适用于兆赫兹频段的振荡频率较高的开关电源。如移动设备的电源等就是应用案例之一。

1.2 电感直流叠加容许电流与降压转换器的输出电流关系

由下表 2 摘录的电感产品目录可知，其标称电感值当然是必须项目。

由表 2 可知，标称电感额定电流是需要仔细确认条件的项目之一。其中一项规定了直流叠加容许电流。直流叠加容许电流是温度上升容许电流，该直流叠加容许电流是作为使直流电流增加、电感值为 -30%、即降低 30% 时的电流所规定的。作为另一个额定电流，规定了温度上升容许电流，即规定了施加直流电流时的温度上升达 40°C 的电流值的最大值，该项条件也因制造商 / 产品而不同（ $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ）。还有一点需要注意。并非每个制造商 / 每种产品都提供直流叠加容许电流和温度上升容许电流这两项。一般来说，仅提供其中一项时，只表示规定了为较小的一项。由于额定电流是重要的项目，故用下图 2 来表示直流叠加和温度上升特性与最大值、typ 值、余量的关系的图。

图 2 中的 typ 值就是其中一个代表性的值。保证规定所容许的最大值及 / 或最小值的值。因此，是对 typ 值是

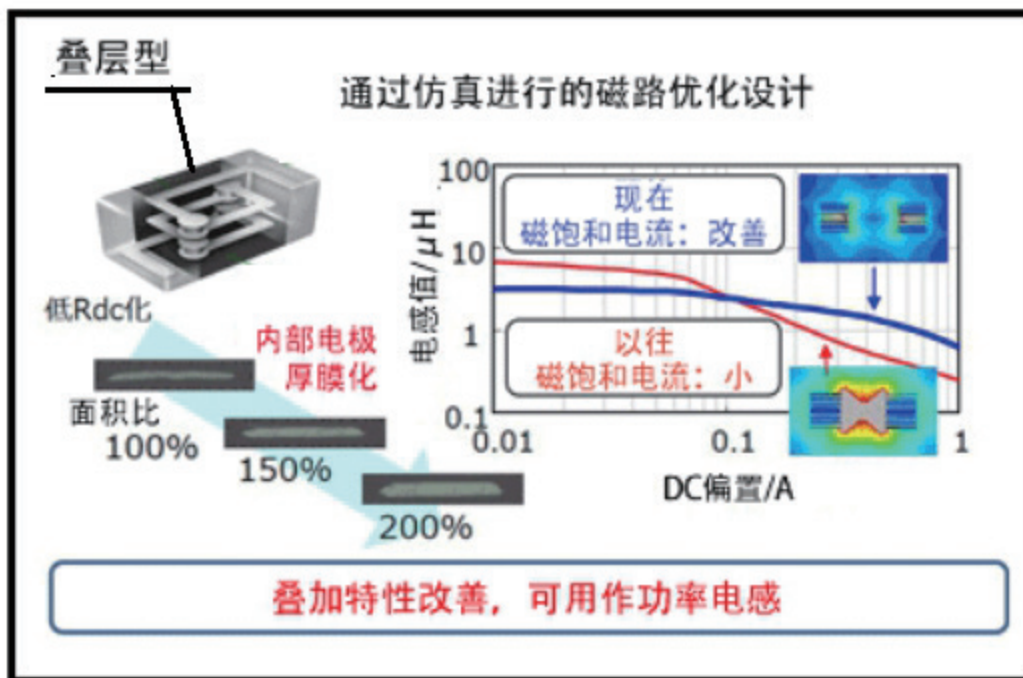


图 1 所示为改进与发展的叠层型功率电感特性示意图

表 2 为摘录的电感产品目录

NR 3015屏蔽型		• 标称电感值 测量频率100kHz的电感值。		• 自身谐振频率 电感与杂电容谐振的频率。 发挥作为电感功能的极限频率		额定电流 (mA)		测量频率 [kHz]
品名	EHS	标称电感值 [μH]	电感值容许公差	自身谐振频率 [MHz] (min.)	直流电阻 [Ω] (±20%)	直流叠加容许电流 I _{dc1}	温度上升容许电流 I _{dc2}	
NR 3015T 1R0N	RoHS	1.0	±30%	100	0.030	2,100	2,100	100
NR 3015T 1R5N	RoHS	1.5	±30%	87	0.040	1,800	1,820	100
NR 3015T 2R2M	RoHS	2.2	±20%	64	0.060	1,480	1,500	100
NR 3015T 3R3M	RoHS	3.3	±20%	49	0.080	1,210	1,230	100
NR 3015T 4R7M	RoHS	4.7	±20%	40	0.120	1,020	1,040	100
NR 3015T 6R8M	RoHS	6.8	±20%	36	0.160	870	880	100
NR 3015T 100M	RoHS	10	±20%	28	0.220	700	710	100
NR 3015T 150M	RoHS	15	±20%	23	0.360	560	560	100
NR 3015T 220M	RoHS	22	±20%	20	0.520	470	470	100
NR 3015T 330M	RoHS	33	±20%	18	0.840	390	370	100
NR 3015T 470M	RoHS	47	±20%	17	1.34	320	300	100

• 直流电阻
施加直流时的电阻值。
卷线电阻为主

• 直流叠加容许电流
直流叠加的电感值为-10%~30% (规格因项目而异)
时的电流值。
NR系列时为-30%。

• 温度上升容许电流
施加直流电流的温度上升为 20°C~40°C
(规格因项目而异)时的电流值。
NR系列时为 40°C%。

一般来说, 额定电流仅提供一项时, 可以认为规定了直流叠加和温度上升其中较小的一项。

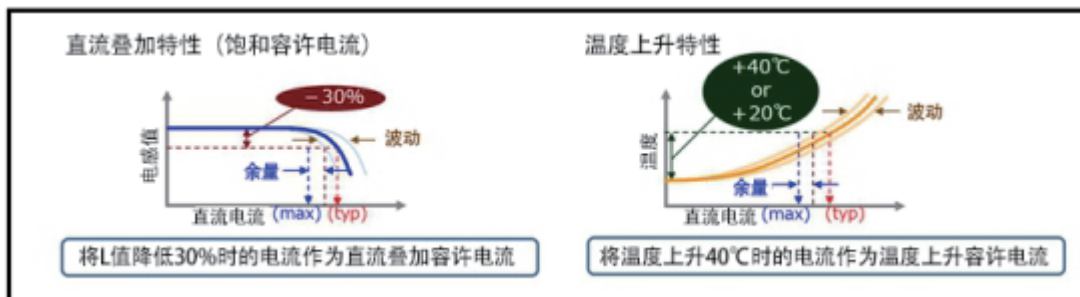


图 2 是表示直流叠加和温度上升特性与最大值、typ 值、余量的关系的图

具有余量的值。

2 降压转换器的输出电流与直流叠加容许电流的关系

图 3 为饱和容许电流和温度上升容许电流与降压转换器的输出电流关系特性示意图。

直流叠加容许电流也被称为饱和容许电流。即波形图 3 中蓝色线所示的电感的峰值电流。当峰值电流超过直流叠加容许电流的最大值时, 电感产生磁饱和, 电感值减少。电感如果饱和, 电感的峰值电流异常变大, 导致效率下降或异常工作, 甚至可能致使电源 IC 被破坏。

温度上升容许电流也可以说是流经电感的电流和电阻成分带来的发热的容许值。在波形图 3 中, 红色所示

的输出 DC 电流与粉色所示的三角波实效电流的合计即为温度上升容许电流。乘以电感的电阻量即为损耗功率, 体现为发热。顺便提一下, 三角波实效电流为峰值电流的 $1/\sqrt{3}$, 这部分成为 AC 损耗。当流过比温度上升容许电流大的电流时, 发热增加, 可能不仅使电感的可靠性下降, 还使外围元器件的可靠性下降。另外, 达到无法容许的发热水平时, 可能引起线缆的绝缘不良, 导致烧损。

* 那么降压转换器峰值电流超过直流叠加容许电流值时的现象又是怎样的呐?

为此请看实际的波形数据图 4。

这是使用三种特性不同的电感的降压型转换器数据。左上为相对于输出电流的效率, 从图 4 中可知, 负载为 500mA 时没有什么差别, 但 1500mA 时蓝色的电感效率

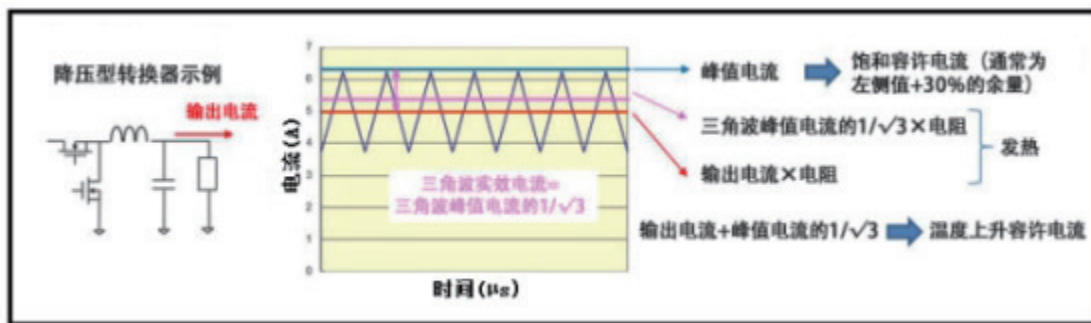


图 3 为饱和容许电流和温度上升容许电流与降压转换器的输出电流关系特性示意图

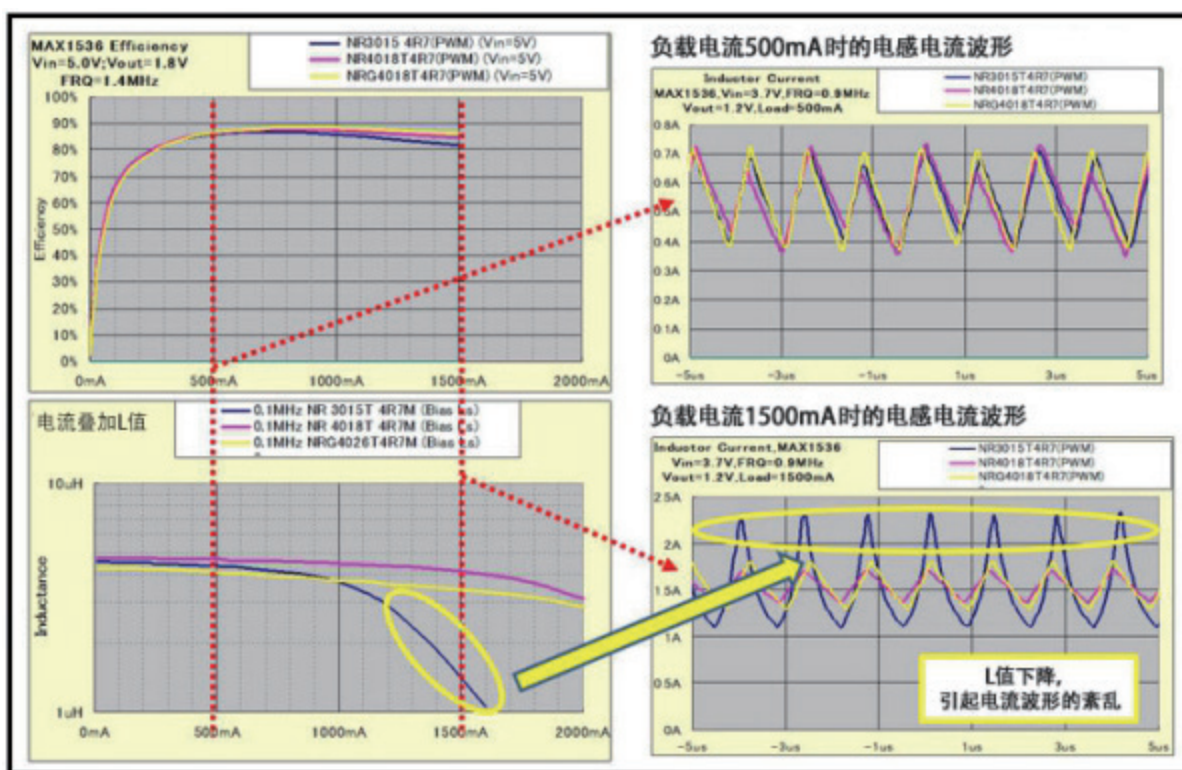


图 4 为峰值电流超过直流叠加容许电流值时的实际的波形数据图

比其他的要低。左下的波形为相对于输出电流的电感值变化，蓝色电感的电感值在负载超过 1000mA 时急剧下降。也就是说该电达到饱和状态。右侧为电感电流的波形。右上为负载 500mA 时效率没有什么差异的状态下的波形，波形无特殊差异，正常。右下为负载 1500mA 时的波形，饱和的蓝色电感的波形波动明显，峰值电流也增加。这是饱和导致电感值下降，从而导致峰值电流增加，进而电感值进一步下降，进一步流过电流的失控状态。也就是说，当出现因负载电流增加导致效率低于预期的症状时，确认

电感电流的波形也是方法之一吧。

基本上在 DC/DC 转换器的评估阶段这是必须的确项目，当观察到类似这样的波形异常时，或峰值电流明显超出计算值时，可以怀疑电感的饱和。顺便说一下，前面提到的鼓套型电感会急剧饱和，因此具有容易失控的性质，而树脂型电感的饱和相对缓和，可以说不易引起失控。

* 那么有关温度上升容许电流电感损耗是怎样的呐？

上述探讨了输出电流的 DC 电流与电感 AC 电流的实效电流、以及电感的电阻。基本上就是如前所述，应该考

考虑 AC 电流的 AC 损耗与 DC 电流的 DC 损耗两方面，但电感的 DC 电阻 Rdc 与 AC 电阻 Rac 不同，需要同时考虑到 Rac 是因频率而变动的。

该图 5 表示某电感的电阻及阻抗与频率的关系。绿线为电阻。Rdc 是频率为零时的值。与之相比，Rac 随频率提高而增加，一般开关稳压器的开关频段 - 几百 kHz 到几兆 Hz 的 Rac 为 Rdc 的几倍到几十倍。

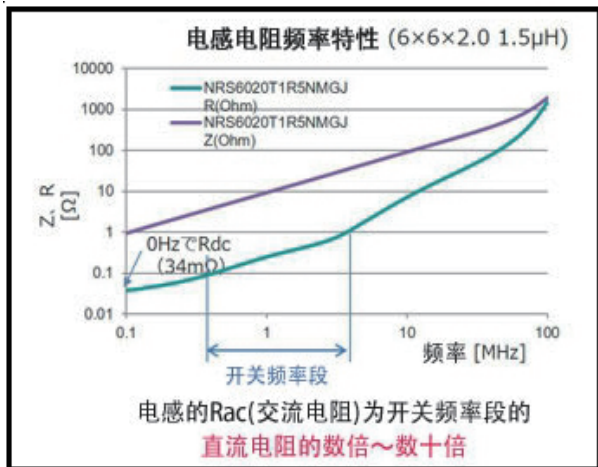


图 5 表示某电感的电阻及阻抗与频率的关系

也就是说，AC 损耗即使电流较小也可产生较大损耗对吧。而开关频率高时更是这样。的确如此。DC/DC 转换器电路负载电流的大小不同，则损耗的主体也有很大不同，为此将从图 6 为 DC/DC 转换器电路及电感损耗功率的公式为重点例作说明。

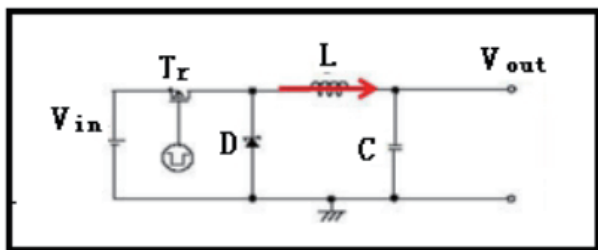


图 6 为 DC/DC 转换器电路

$$W_{-L} = W_{-dc} (\text{DC损耗}) + W_{-ac} (\text{AC损耗})$$

$$= R_{dc} \times I_{dc}^2 + R_{ac} \times I_{ac}^2$$

电感损耗功率的公式

为什么 DC/DC 转换器电路因负载电流的大小不同，则损耗的主体也有很大不同呢？

从电感损耗功率的公式可知其电感的损耗功率为 DC 损耗功率 + AC 损耗功率之和。首先看负载较轻状态，输出电流小因此 DC 损耗少，AC 成分占主导因而 AC 损耗占主导地位。相反，负载较重的状态，即输出电流较大的状态下，DC 电流占主导。从实测的效率数据可知，相同 DC/DC 转换器电路，使用电感值相同但结构、尺寸、及容许电流不同的电感时其负载 - 效率特性及各电感的 Rac 频率特性也是不同的。

在负载较大的区域，电感的 Rdc 带来的 DC 损耗占主导地位。而在轻负载区域，Rac 带来的 AC 损耗占主导地位。

* 需要指出的是根据电感的种类，Rdc、Rac 均有波动，尤其 Rac 的波动较大。那么不同电感种类的波动较大，这会产生什么问题呢？

例如，像智能手机一样待机状态较长的设备，其工作时间多为待机状态，负载电流即 DC 电流非常小。也就是说，AC 损耗处于主导状态，电流尽管微小，但也产生相应的损耗。那么这类设备如果使用 Rac 较大的电感会怎样呢？其一是待机时间变短，电池的寿命可能会受影响。电源是电池，因此应该先降低待机时的损耗。如果设计人员不了解电感的这些特性而选用了 Rac 较大的电感，则电池驱动的便携设备可能无法实现预期的工作时间。待机状态较长的电池设备，Rac 小这一点是非常重要的；其二是也就是说电感选型时，不仅仅关注电感损耗导致的发热，还要了解损耗因素与特性，这是非常重要的。

3 了解电感的基本特性，还需要知道等效电路与各成分

通常在分析电容器时，就知它具有 ESR 和 ESL 等寄生成分及其影响。而电感除规格理解外电感同样也有寄生成分。可用电感等效电路图 7(A) 进行说明。Rdc 主要是卷线的直流电阻，也被称为“铜损”。这是与电感串联的成分。Rac 主要是铁芯材料的损耗，也被称为“铁损”。如电容与电阻所表示的，具有频率特性。频率高则阻抗下降，损耗增加。绝缘电阻是对应于泄漏电流的直流电阻。电容是由于卷线被聚氨酯等薄膜绝缘，因此卷线与夹着绝缘物的

下转170页