

车载用高频电抗器开发特点

Development of Reactor for Hybrid Electric Vehicles characteristics

聂应发

田村（中国）企业管理有限公司（惠州分室）

摘要：开发车载用电抗器是随着汽车迅速发展起来的高频高效率的电抗器，在电子行业日益高频化，小型化驱动下，新型高频电抗器需求也发展较快，开发这种高频电抗器，需要丰富的理论和实际知识，因此本文拟对以上具体深入地探讨，对于从事车载用高频电抗器开发者，有一定的参考价值。

关键词：电抗器，铁心及气隙分布，设计

众所周知，车载电抗器用途较为广泛，可为混合动力车、燃料电池车、及升压回路中使用及高频电抗器。

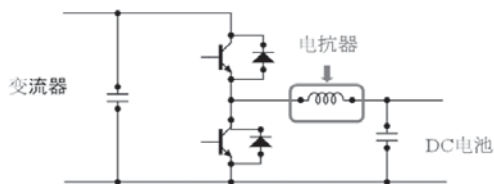
一般电抗器是用来限制电网电压突变和操作过电压引起的电流冲击，平滑电源电压中包含的尖峰脉冲，或平滑桥式整流电路换相时产生的电压缺陷，有效地保护变频器和改善功率因数，它既能阻止来自电网的干扰，又能减少整流单元产生的谐波电流对电网的污染。

电抗器有不同的分类方法，按接法可分为并联电抗器和串联电抗器；按功能可分为限流电抗器和补偿电抗器；按用途可分为限流电抗器、滤波电抗器、平波电抗器、阻尼电抗器等。

但对车载用高频电抗器来说，有如下特点和优点：

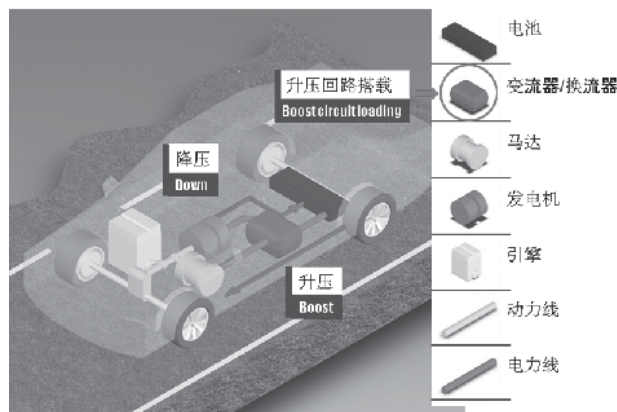
- 1) 阻止高频成分电流，对（有源滤波器）搭载时，效率改善回路。
- 2) 能平滑直流电流，当脉动电流搭载时，可平滑化回路。
- 3) 能消除噪音，当电源回路有 EMC 对策，可对噪音进行除去。
- 4) 能对直流电压进行升压，可对回路搭载，进行升压处理。其中升压回路如下图。

升压回路（一例）



在车载系统中，电抗器是升压、提高效率和降低噪声不可缺少的部品，发挥着重要的作用。如何更好发挥其作用，进行优化设计，是非常重要的，下面从原理、材料及工艺优化，从而达到更优的效果。车载系统原理图如下：其中电抗器作为一个重要部品。

车载用系统概念图

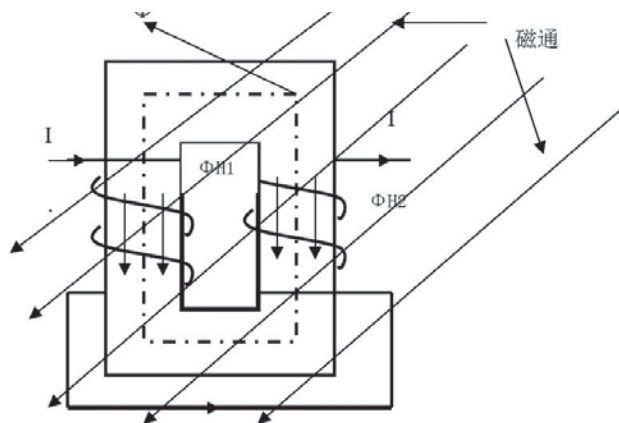


我们知道，一般高频电抗器主要材料及构成如下：

- 1) 铁心：作为导磁作用，有叠积在一起的矽钢片、铁粉、铁硅铝、铁氧体及非晶等导磁材料。
- 2) 铁心结构：有铁心中间带间隙和内部磁芯带有间隙。
- 3) 铁心形状，有 UU, UI, EE 型等等。其中 UU 较大优势，
- 4) 导线：作为导电作用：如铜线（铝线）或铜铝线，形状圆线、扁线、铜（铝）箔及多根细线组成捻线等电线。

其中磁芯为芯式结构，采用两边卷数相等时进行串联在一起的内铁心的一种结构形式，如下图所示，卷线电流 I，

在铁心的导磁下产生磁通 Φ ，当因外部磁界 H 存在并追加影响，这个磁界的卷线处的竖直和平行而产生磁通 Φ_H ，加在左右线圈因外部磁通影响而产生 Φ_{H1} 和 Φ_{H2} ，但由于两者大小等同且方向相反使得两者相互抵消。因此受外



界磁通影响是很小的。还有一个显著特点，这种结构形式两个等同线圈因磁通作用，向外产生漏磁通，因两个相反方向而抵消，所以对外电子部品影响显著减少。

要确保好的高频电抗器，首先我们对磁（铁）心材料进行分析入手：

要求必须铁心损耗特性必须良好，而且具有低保磁力、高饱和磁束密度特性且电感特性良好铁心材料：如软质磁性材料可以基本满足要求，可分为如下：

软质磁性材料 — 氧化物磁性材料 — Mn-Zn系铁氧体
— Ni-Zn系铁氧体
— 金属软质磁性材料

当前最为成熟用的铁心材质，主要有以下品名及素材、使用范围及频率和优势：

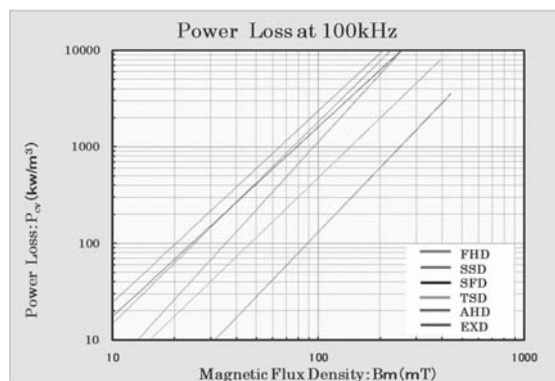
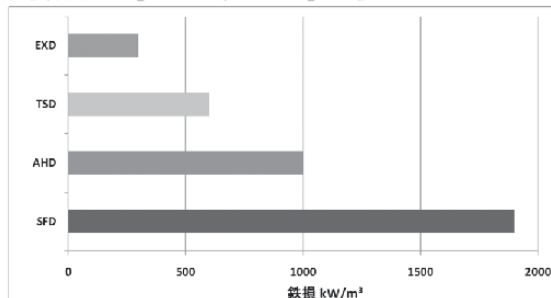
品名	飽和磁束密度 B_s [T]	直流初透磁率 μ_{dc}	比抵抗 ρ [$\mu\Omega \cdot cm$]	居里溫度 T_c [°C]	磁歪定数 $\lambda \times 10^{-6}$
純鉄	2.15	300	11	770	15
3%Si-Fe珪素鋼	2.00	1,000	45	750	~2
6.5%Si-Fe珪素鋼	1.80	3,000	82	690	0.2
PB(50%Ni-Fe)	1.60	2,500~4,500	45	500	20
PC(78%Ni-Fe)	0.70~0.80	10,000~100,000	60	350~400	~0
鉄系-非晶体	1.56	2,000~8,000	137	415(550)	27
Mn-Zn鉄氧体	0.35~0.40	1,500~10,000	10^3	130~250	~0
Ni-Zn鉄氧体	0.20~0.30	20~1,000	10^8	110~350	~0

制品名	素材	用途	仕様	B_s	Loss	Cost
铁镍合金 代号: AHD Fe-50%Ni	非晶	電源/電装	PFC/平滑 ~ 200kHz	Δ	$\odot$	Δ
铁硅铝 Fe-Si-Al 代号: TSD	铁粉体	電源	PFC/平滑 ~ 300kHz	$\times$	$\odot$	$\odot$
铁硅硼 Fe-Si-B 代号: EXD	非晶	電源/電装	PFC/平滑 ~ 400kHz	Δ	$\odot$	Δ
纯铁 代号FHD, SKP	純鉄	UPS/車載	PFC/平滑 ~ 20kHz	$\odot$	Δ	$\odot$
铁硅 Fe-3.5%Si 代号: SSD	珪素鋼	UPS/車載	PFC/平滑 ~ 40kHz	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
SFD(N) Fe-6.5%Si 代号: TSD	珪素鋼	UPS/車載	PFC/平滑 ~ 50kHz	$\bigcirc$	$\odot$	$\bigcirc$

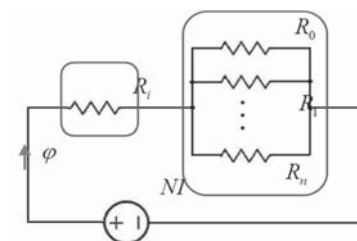
以上材料主要特性，

1) 铁损比较，当 100kHz，磁密在 100mT 时铁损。

铁损特性 【100kHz, 100mT】 比较



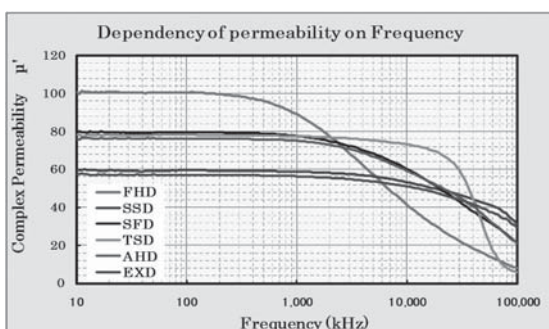
当电抗器大电流通过时，必须追加气隙，以增加其抗饱和性，气隙有磁性的等效电路如下：



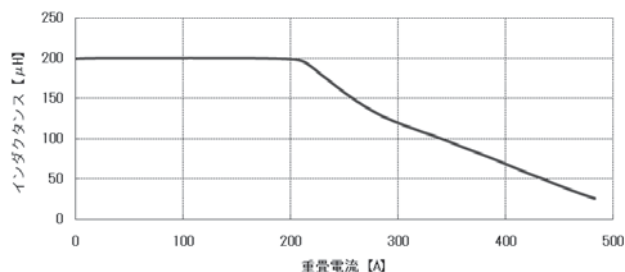
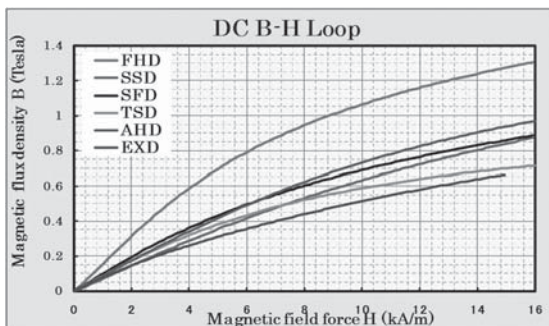
在大电流重叠下，会使电感值下透磁率为非线性情况存在，铁芯的磁导率是非线性性的。

$$L = N \frac{\Phi}{i} = \frac{N^2}{1/P_{\text{core}} + 1/P_{\text{gap}}}$$

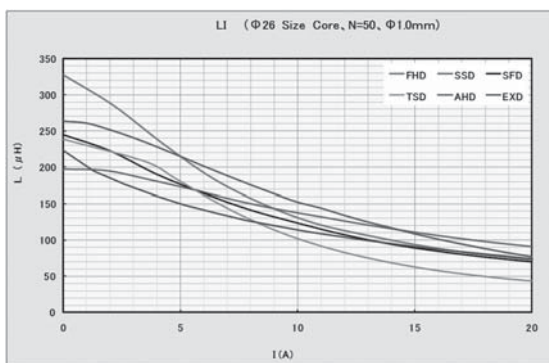
2) 特性透磁率比较



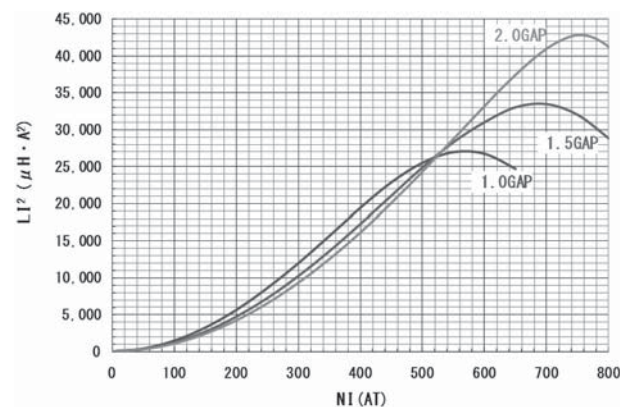
3) 磁场强度与磁场密度比较



4) 特性负载电流与电感量比较

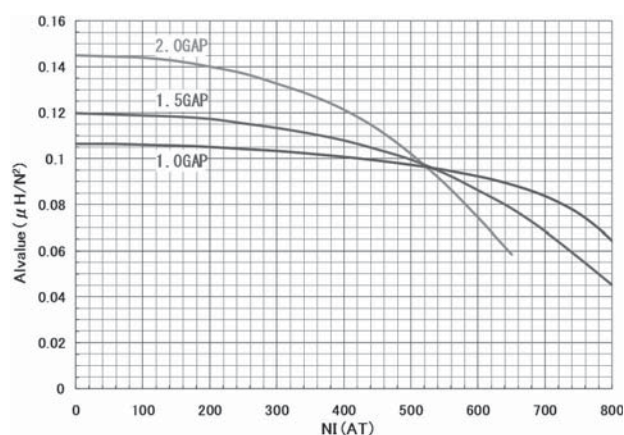


实际上，如果根据样品，对各铁芯 NI 与 LI2（间隙值）特性图作成图表，设计方便且较容易。

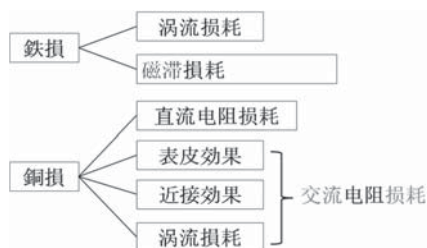


5) 特性高频成分与单位损耗比较

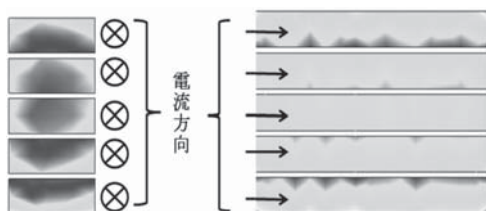
而且如再根据样品，对各铁芯 NI 与 AL（间隙值）特性图作成图表话，设计方便且较容易。



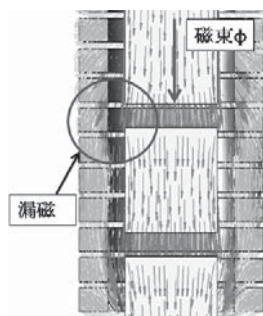
对于低损耗规格要求时，必须首先分析损耗来源是从哪里来的？我们知道电抗器的损失主要为铜损和铁心损失 2 种，具体来源分以下几种：



1：对于直流电损耗，可通过铜电阻与电流计算出其损失，但表皮的效果和邻近效应，当高频，导体内的电流密度分布均匀消失现象，难以计算出损耗。涡流损耗如下。



从涡流损失间隙过来的漏磁束，线圈内发生涡流线圈内发生涡流，这个较难计算出来。

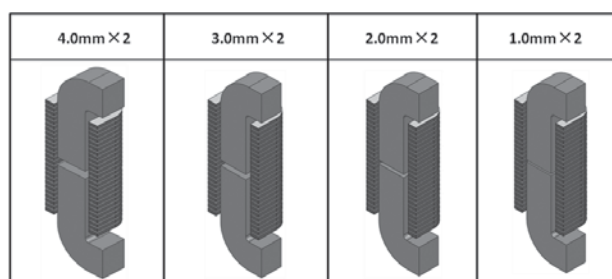


渦電流公式可通微积分较复杂计算出来。

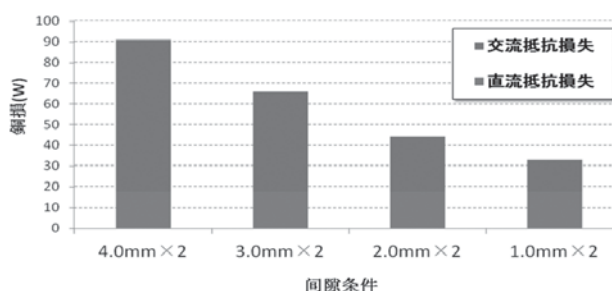
$$I_T = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \sigma \left(\frac{W}{2}\right)^2 D \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3 \cosh(2n+1) \frac{\pi L}{2W}} \right]$$

对交流成份电阻损耗是不可手工计算出来，但是必须用有限要素法的磁界解析法算出。

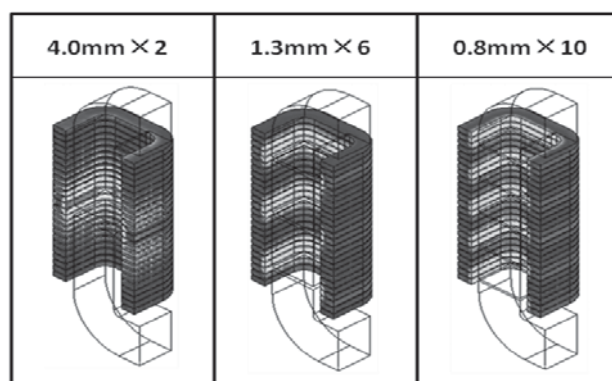
下面着重说明一下，间隙厚度与铜损之间关系，如下图所示，单侧如下：



经过样品分析，可以得出间隙厚度不同与铜损之间关系。

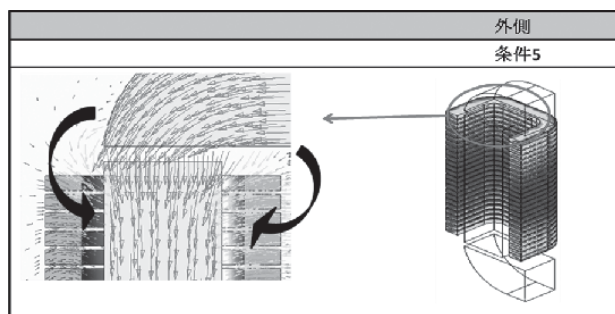
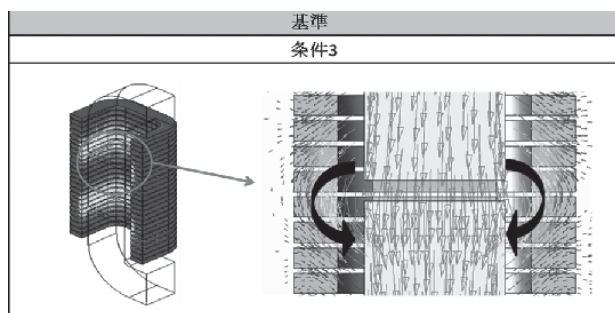


通过样品测试，间隙厚度分布与铜损发热真实图比较如下：



间隙厚度与磁力线分布图关系图如下：

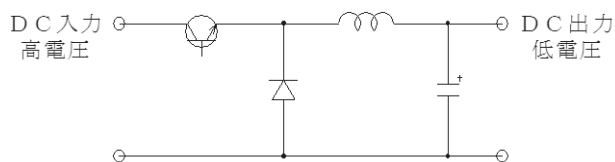
综上述所示，可总结如下：为了抑制住铜损，必须使用最低限度间隙厚度，而且尽可能增加分割气隙数。同时将



分割数增加越多，铜损将更加减少。间隙所处于位置及铜损最小有最优点存在，这是优化设计关键所在，同时差距的位置和铜损选择合适点，根据需要间隙调整的位置有必要和选择的，

而且我们必须理解，对于基础的开关回路有两大类：

1) 降压截波整流器

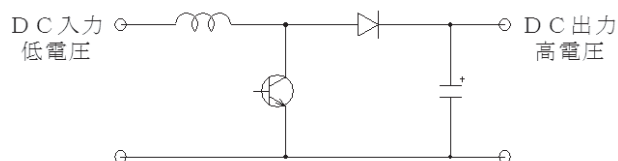


降压截波整流器

2) 降压截波整流器又可分为连续模式及不连续模式：其计算公式如下：

连续模式	不连续模式
电压: $V_i - V_o$ 电流: I_o $T_{on} = \frac{V_o}{V_i} T$ $B_{T-T} = \frac{(V_i - V_o) T_{on}}{N S} \times 10^7$	电压: $V_i - V_o$ 电流: I_o $T_{on} = \sqrt{\frac{2 L V_o I_o T}{V_i (V_i - V_o)}}$ $B_{T-T} = \frac{(V_i - V_o) T_{on}}{N S} \times 10^7$

3) 升压截波整流器，电路图如下：



升压截波整流器

4) 升压截波整流器连续模式及不连续模式

连续模式	不连续模式
电压: V_i 电流: I_i $T_{on} = (1 - \frac{V_i}{V_o}) T$ $B_{T-T} = \frac{V_i T_{on}}{N S} \times 10^7$	电压: V_i 电流: I_i $T_{on} = \sqrt{\frac{2 L I_o T (V_o - V_i)}{V_i}}$ $B_{T-T} = \frac{V_i T_{on}}{N S} \times 10^7$

为了更加详细说明，现举例如下：

条件如下：

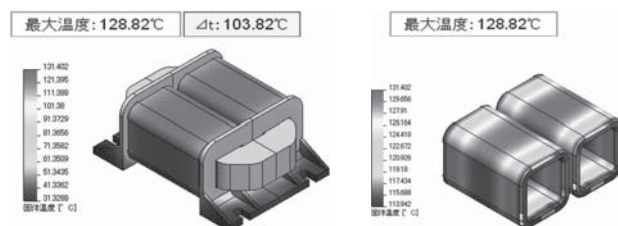
升压截波整流器：绝缘等级为 H 级；输入 200V，输出 400V 定格平均电流。

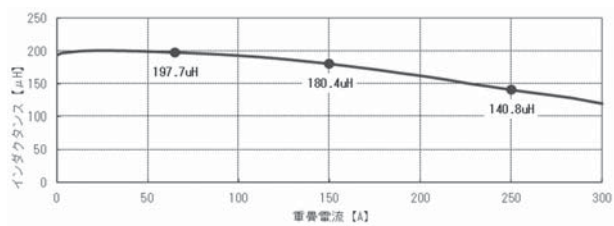
150A 过渡电流：200A 频率：10kHz，Duty：50% 初始电感量：200uH 以上（0A 时）。

180uH 以上（150A 时）140uH 以上过渡电流：200A，尖波定格电流 50A，温度上升为 130K MAX。

我们选用能降低涡流损耗的铜扁线，规格选取 2X8，总圈数 52T，总间隙 GAP 为 12mm（各 2mm 为 6 处），通过计算选取磁通密度 0.9T（在定格电流），过渡磁密为 1.3T，磁心采用高导的磁粉芯为 FHD（纯铁心），通过磁界解析法样品模拟升温为在 110K 左右，规格尺寸选取如下：总效率将达到 95% 以上。

② 热解析 → 温度上昇模拟测试





结束语

车载用高频电抗器在汽车电子日益发展的今天，开发及实用价值具有十分重要意义。如何开发出以其优良的性能和有竞争力的性能价格比电抗器，是大家面临诸多的难题，随着高频电抗器技术性能进一步提高和研究，它将会在高频电抗器领域中有更广阔的应用前景，提高电源效率。

