

新型Molding电感用高性能合金粉材料

黄静, 方萌, 谈敏, 聂敏, 夏胜程

深圳顺络电子股份有限公司, 深圳 518110

摘要: 近些年随着电子产品的更新迭代速度越来越快, 消费类电子终端产品不断走向“小型化、集成化、多功能化、大功率化等”的发展方向; 在电感行业的美商Vishay握有的Molding专利将于2017年到期解禁之际, 加之目前传统功率电感的局限性; 为了应对未来市场对一体成型电感的需求, 我司通过采用高特性铜线材料、高密度压制工艺开展了对一体成型电感的深入研究, 本文主要介绍Molding上的材料探索; Sunlord通过对复合性材料性能的研究, 结合Molding电感的产品特性、用材要求, 发挥磁材的极限特性, 使产品达到最佳的电气性能, 研发推出一款兼具高磁导率、高饱和特性、高强度性能的铁硅铬材料, 并将该材料成功应用于Molding电感。

关键词: 一体成型, 高密度, 高磁导, 高饱和特性

The New Molding Inductor with High Performance Alloy Powder

Huang Jing, Fang Meng, Tan Min, Nie Min, Xia Shengcheng

Shenzhen Sunlord Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518110

1 引言

随着消费移动终端领域的风向标企业的需求改变, 产品的性能、尺寸、品质都提出了高标准的要求, 但传统工字绕线平台已很难满足需求, 现有尺寸产品特性受磁芯、磁胶材料、点胶工艺瓶颈限制, 短期内很难再有质的突破, 进一步小型化也有较大的局限性; 叠层产品虽然在小型化方面优势明显, 但由于银浆电阻率先天性的短板, 未来市场对一体成型电感的需求必然增加。

智能手机CPU的多核化发展迅速, 四核、八核已经成为主流, 射频部分则向多模多频方向迅速发展, 屏幕由最初的3寸屏演进到7寸屏, 并形成5寸以上屏幕的市场主流, LED背光灯数量也从6颗发展到8颗、10颗、12颗; 另外随着IC技术的发展, 开关频率会从目前的3.0MHz往5~6MHz发展。以上智能手机发展的趋势必然导致功率电感产品尺寸进一步减小的同时, 要求具备大电流、低功耗的特点。

一体成型电感产品多采用羰基铁粉为原料, 羰基铁粉的特点为叠加电流好、材料成本低, 但其磁导率较低, 制作大感值产品时需要增加线圈数, 几乎摆脱不了产品的高

DCR、高功耗的缺陷; 结合Molding产品主要会应用于一些DC Module、工控主板、显卡、平板电脑、笔记本电脑、车载设备、分配电源系统、LED路灯设备、通讯设备、医疗设备等, 在这些应用位置中均会有大电流的流通的特点, 因此我们着重对高磁导、优良的饱和特性和低功耗材料进行研发探索。

一体成型电感具有体积小、低损耗、屏蔽性能优良、可靠性高、适合于高密度表面安装的特点, 在消费电子、数码产品、移动通信、计算机、高分辨率电视机、机顶盒、交换机、路由器、光纤通信设备、广播、卫星、汽车电子、工业控制等领域获得广泛的应用, 逐步成为电感市场的主流方向。一体成型电感磁路封闭、具有良好的磁屏蔽性、不会干扰周围的元器件, 也不会受临近的元器件的干扰, 其优异的EMI性能, 有利于元器件的高密度安装, 一体化独石结构、密度高、机械强度高、可靠性高、耐热性好、可焊性好、形状规则整齐, 适合于现代的自动化表面安装流水线生产工艺。同时, 随着电脑主板技术的发展和电源技术的发展, CPU主频越来越高, 因此对稳定供电和滤波方面都有很高的要求, 一体成型电感解决了这个问题,

它不仅能在大电流的条件下长期工作并为 CPU 稳定供电，而且在滤波方面一样毫不逊色。良好的材料特性和特殊设计，在保证电感结构更稳定和直流电阻更低条件下，具有更高的效率。

为了应对未来市场对该类电感的需求，我司对 Molding 电感的用材进行了相关探索，主要对比研究了不同软磁材料的压制性、强度、磁导率、饱和特性、功耗等方面差异。

2 实验部分

2.1 粉料制作

①材料类型

根据 Molding 电感的性能特点和市场上同类电感用材，我司与材料合作厂商合作研发了一款 FeSiCr 系的粉料，本次实验我们将选择羰基铁粉和铁硅铬两种材料进行对比实验；其中羰基铁粉 D (50) 为 7 μ m，FeSiCr 粉料 D (50) 为 10 μ m，图 1 中 (a) 为羰基铁粉形貌、(b) 为 FeSiCr 形貌，从 SEM 图可知羰基铁粉和铁硅铬粉料的形貌均为圆球形，球形粉料在压制时，粉料颗粒间空隙较多，压制的坯体密度不够，本次实验将添加适量 D (50) 为 3 μ m 的同类型粉料进行级配，通过级配增加间隙的粉料填充，使压制时粉料的密度大大提高。

②浆料制备

将粉料与粘结剂溶液、脱模剂溶液按 7:2:1 比例混合，将粉料在研钵在中反复混合搅拌，混合完成后将粉料放入烘箱中进行烘干，减少粉料液体含量，提高粉料的流动性；烘干后将粉料过筛 80 ~ 300 目，取 300 目以上粉料，并

测试粉料的流动性和松装密度。

③磁环压制

采用同一台压机对造粒粉料进行磁环压制，模具为 $\phi 8.05\text{mm} \times \phi 5.00$ 磁环，成型压力为 900MPa、1200MPa、1900MPa，得到磁环坯体后分别进行热处理。

④磁环测试

采用排水法测量样品的密度；采用 WK3260B 精密分析仪测量绕线磁环电感量 L_s 及品质因数 Q （用直径 0.40mm 的漆包铜线绕磁环 26 圈，留 15mm 尾线，以便引出测试），测试频率为 100KHz，再由电感量 L_s 计算磁导率 μ_i 。

2.2 测试结果与分析

2.2.1 密度

压制压强与磁环密度关系如图 2 所示：

通过对比发现，粉料随着压制压力的增大，磁环密度也随之增大；在相同的压力下 FeSiCr 粉料比羰基铁粉的压制密度更小。通过粉料的级配，充分对粉料间隙进行填充，因此磁环的密度增大，在热处理后材料颗粒的膨胀粘接，促使粉料颗粒间隙进一步减小，致密化程度提高，得到更高的磁导率性能。

2.2.2 抗弯强度实验^[2]

压坯强度是指压坯抵抗外力作用保持其几何形状和尺寸不变的能力，是反映粉末质量优劣的重要标志之一。压坯强度的测定方法目前主要有：压坯抗弯强度试验法和测定压坯边角稳定性的转鼓试验法，此外还有圆柱状或轴套形压坯沿其直径方向加压测试破坏强度(压溃强度)的方法。

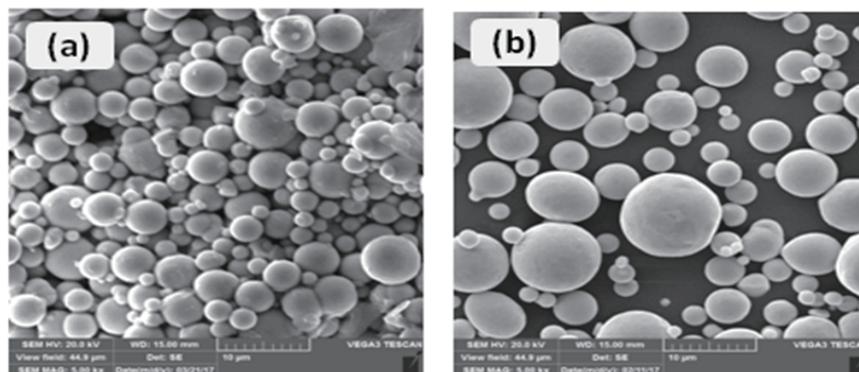


图 1 合金粉料扫描电镜形貌图 (a) 羰基铁粉；(b) FeSiCr 粉料

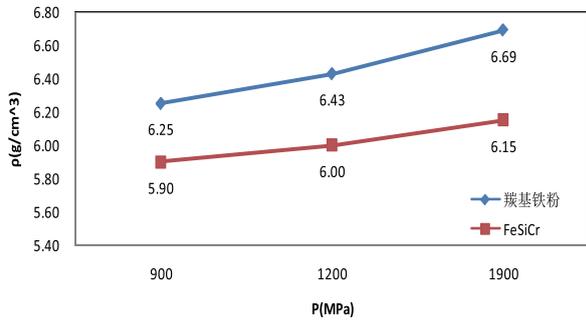


图2 压制压力与磁环密度曲线图

抗弯强度试验用压坯试验 ASTM 标准是：宽 12.7mm，厚 6.35mm，长 31.75mm（中国标准 GB5319-85：12×6×30mm）。在标准测定装置上测出破断负荷，根据下列公式计算：

$$\sigma_{bb\text{压坯}} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{公式 (1)}$$

式中 $\sigma_{bb\text{压坯}}$ —— 压坯抗弯强度，MPa；

P —— 破断负荷，N；

L —— 试验支点间距离，ASTM:25.4mm（中国：25mm）；

b —— 试样宽度，mm；

h —— 试样厚度，mm；

压溃强度的测试方法如图 3 所示。这种压溃强度是粉末冶金轴套类零件的特有的强度性能表示方法。

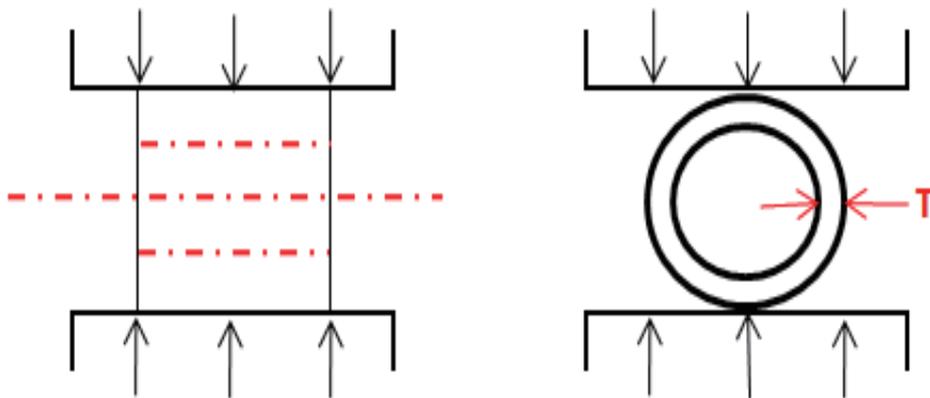


图3 压溃强度测定示意图

测定时，将轴套试样放在两个平板之间，逐渐增加负荷直到试样出现裂纹而负荷值不再上升为止。此时，所指的力即为压溃负荷，按下列公式计算得的 K 值即为径向压溃强度：

$$K = \frac{P(D-T)}{LT^2} \quad \text{公式 (2)}$$

式中 K —— 压坯径向压溃强度，MPa；

P —— 压溃负荷，N；

T —— 试样厚度，等于 $\frac{1}{2}$ (外径-内径)，mm；

D —— 试样外径，mm；

L —— 试样长度，mm。

将 FeSiCr 材料与羰基铁粉的粉料制作成标准试样，测试材料的抗弯强度，测试数据如图 4，对比发现 FeSiCr 材料的强度随着压制压力的上升而呈线性上升，1200MPa 时羰基铁粉的标准样强度相对于 FeSiCr 低了 28%，由此

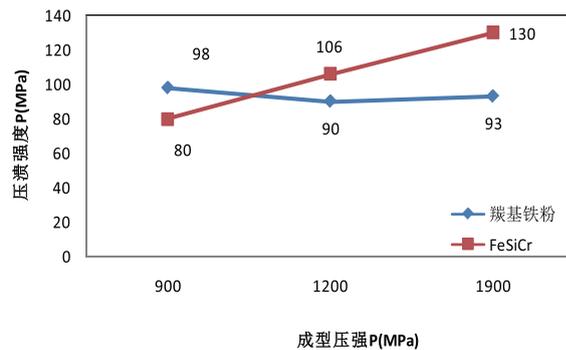


图4 压溃强度曲线图

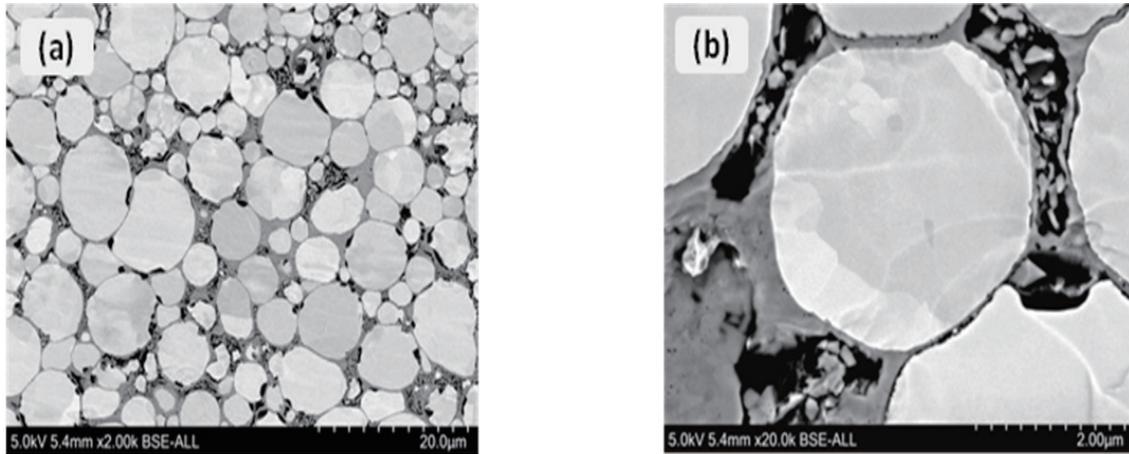


图5 FeSiCr磁环不同倍率下形貌图(a) 2K ; (b) 20K 的SEM

可以看出 FeSiCr 的强度远远高于羰基铁粉。由图 5 可以看出粉料颗粒之间生成了一层浅褐色的膜，该结构层将粉料颗粒牢牢的粘接在一起，这就是 FeSiCr 磁环具备高强度的原因；FeSiCr 材料中适量的 Si 元素和 Cr 会提高样品颗粒的强度，会使颗粒尺寸变大，能够很好的融入晶格，提高样品的长径比；所以强度上 FeSiCr 明显高于羰基铁粉。

2.2.3 磁导率^[2]

磁导率的计算公式我们引用：

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r SN^2}{l_e} \quad \text{公式 (3)}$$

其中 L 代表电感，采用 WK3260B 型测试仪器在 1V/100KHz 条件下测得， μ_0 为真空中的磁导率 $4\pi \times 10^{-7}(\text{H/m})$ ， μ_r 为所测得的磁环磁导率， S 表示磁路的有效截面积， N 表示线圈的匝数， l_e 为磁路长度；两

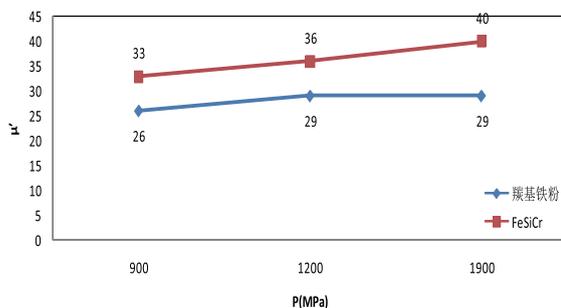


图6 不同的压制压力下的磁环磁导率变化图

种材料在不同的压制压力下的磁环磁导率如图 6，由图 6 我们不难看出羰基铁粉和 FeSiCr 粉料的磁环磁导率随着压制压强的增大而增大，当压制压力达到 1200MPa 后，羰基铁粉的磁导率曲线基本保持不变，FeSiCr 的磁导率仍然在上升，主要因为 Si,Cr 的引入会一定程度的降低 Fe 的磁致伸缩系数和矫顽力从而导致材料磁导率上升。

2.2.4 频谱特性

两种粉料压制的磁环的磁导率 μ_i 和 Q 值与频率 f 的关系分别如图 7、图 8 所示：

频谱图线的测试范围为 1M-1GHz，测试电性参数 L 、 Q ，通过频谱图线的对比可以看出 FeSiCr 材料在磁导率、品质因素数值上均高于羰基铁粉； Q 值越高，其储能与耗能比值越高，材料储能特性越好。

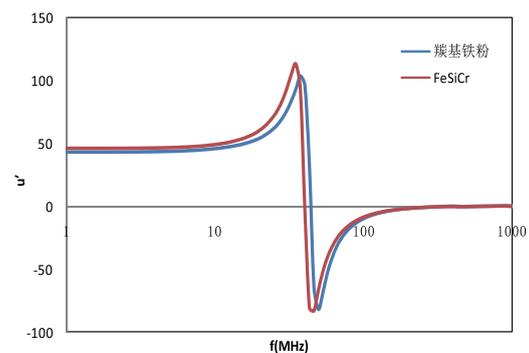


图7 磁环的 μ_r - f 图

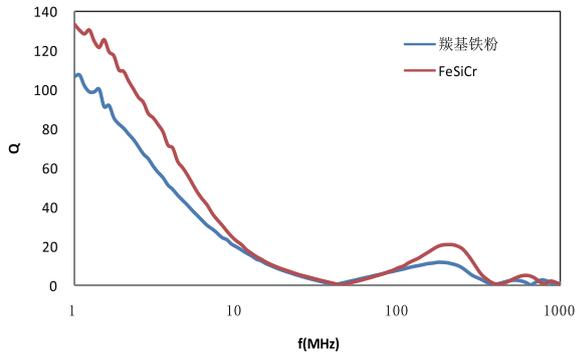


图 8 磁环的 Q-f 图

2.2.5 饱和特性

采用 WK3260B 电性测试仪器在 1V/100KHz 测试条件下对磁环进行饱和特性测试，记录磁环的电感值随着电流增加的变化并绘制成图 9，由图可知 FeSiCr 磁环在电流叠加为 10A 时，电感下降了 27.90%，羰基铁粉的电感量下降了 30.81%，通过 SEM 的形貌观察知道，原形的颗粒粉料在压制后，整个磁体的气隙分布较均匀，颗粒中的可转动磁畴增加，从而提高了材料的饱和段特性。

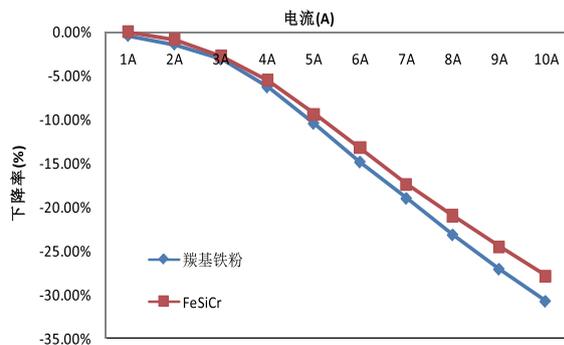


图 9 不同叠加电流下磁环电感量下降率变化图

2.2.6 功耗

磁性材料在交变磁场中产生能量损耗，称为磁损耗。磁损耗包括三个方面：涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗。材料总的磁损耗就等于上述三种损耗之和。现用 W 表示单位体积总的磁损耗，则：

$$W = W_h + W_e + W_c \quad \text{公式 (5)}$$

式中， W_h 为磁滞损耗； W_e 为涡流损耗； W_c 为残留损耗。

$$W_e = afd^2 B_m^2 / \rho \quad \text{公式 (6)}$$

式中材料厚度为 d ，电阻率为 ρ ，引入常数 a ，可以看出涡流损耗与交变磁场频率 f 成正比，与厚度 d 的平方成正比，与电阻率 ρ 成反比。通常采用两种方法来降低材料的涡流损耗：①降低材料的厚度；②提高材料的电阻率。对于金属磁性材料来说，电阻率一般都比较低，涡流损耗很大。通常采用添加合金元素的方法提高电阻率，在铁中加入少量硅，在提升磁导率、降低矫顽力的同时也提高了材料的电阻率^[3]。

将两种材料压制成磁环，在条件为磁感应强度 B 为 100mT，测试频率为 100KHz、500KHz、1MHz，温度为 25℃的条件下，测试磁环的体积功耗，不同频率下功耗的对比如图 10；对比发现 100KHz 下 FeSiCr 磁环的体积功耗相比羰基铁粉磁环的下降了 59%；因为羰基铁粉材料的主要成份为 Fe，材料本身铁的纯度越高，其电阻率就越低，其功耗则越大；而添加了适量硅元素的 FeSiCr 材料电阻率增大，涡流损耗随之降低。

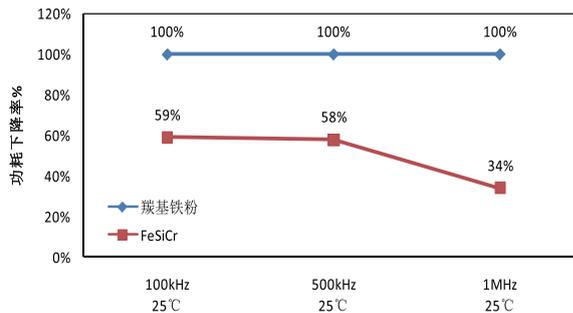


图 10 不同频率下功耗的对比图

3 产品部分

3.1 产品简介

Sunlord 一体成型电感外观如图 11 所示：

一体成型电感多采用低温烘烤成型，产品能快速的自动化生产，大大缩短了工艺周期；但是羰基铁粉的低磁导率必然导致了大感值的产品必须依靠增加线圈数来实现，

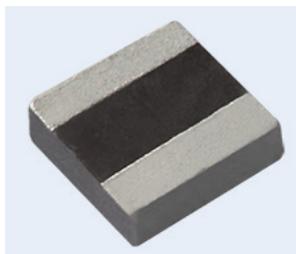


图 11 Sunlord 新型一体成型电感示意图

所以一体成型电感产品几乎摆脱不了产品的高 DCR、高功耗的缺陷；本论文将上述的 FeSiCr 材料应用于一体成型电感，在充分发挥该软磁粉料高磁导率和高饱和特性的同时，大大的降低了产品的 DCR 和功耗。

3.2 可靠性

Sunlord 一体成型电感 48h 的盐雾 (35°C, 5%) 试验后的外观展示如图 12：

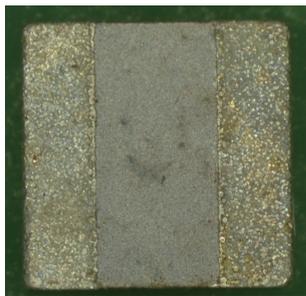


图 12 产品盐雾试验后示意图

Molding 电感采用的是防锈能力较强的合金粉末压制，材料中的 Cr 元素提高了材料的抗腐蚀能力，产品在

48h 的盐雾 (35°C, 5%) 试验后外观依旧 OK。

4 产品性能

4.1 软饱和特性

Sunlord 一体成型电感与铁氧体产品的软饱和特性对比如图 13。

对比 FeSiCr 材料压制的产品与铁氧体产品的性能，由图 13 我们可以清晰的看出，Sunlord 的一体成型电感饱和曲线呈直线平缓下降，铁氧体产品的饱和点较小，达到饱和后下降速率急剧增大。

4.2 电性能比较

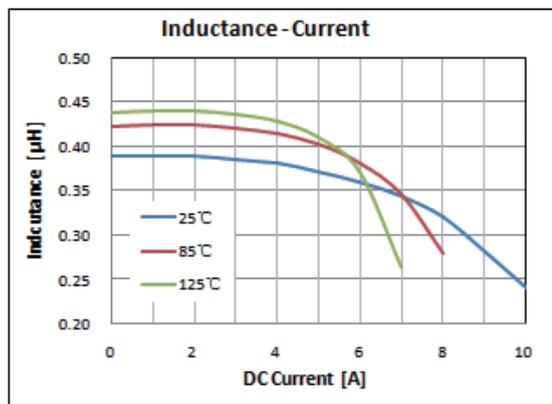
国内外厂商一体成型电感电性对比表

表 1 不同厂商产品电性对比表

Company	Part Number	Inductance	Saturation Current		
			DCR	TYP	MAX
/	Units	μH	mΩ	A	A
国外厂家 1	4012R47	0.47	23	6	8
国外厂家 2	0412R47	0.47	19	6.5	8.6
国内厂家 3	041R47	0.47	19	6.8	/
国外厂家 4	4040R47	0.47	25	7.5	10
Sunlord	4012R47	0.45	9.12	8	10.06
国外厂家 5	4012R22_	0.22	9.7	/	16
国外厂家 6	1616R22	0.22	11	/	20
Sunlord	4012R22	0.23	6.98	13	16

根据表 1 我们可以清楚的看出 Sunlord 的 Molding 电感在 DCR、Saturation Current 电性上能表现出更好的性能数据；我司的 Molding 电感 R47 和 R22 型号的

铁氧体产品



Sunlord Molding

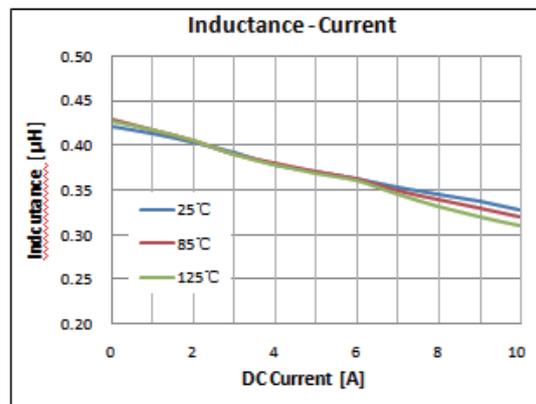


图 13 不同产品软饱和特性

DCR 和最低的厂家相比小了 52% 和 27%。

4.3 转换效率

Sunlord 的 Molding 电感与同行产品的转换效率对比如图 14。

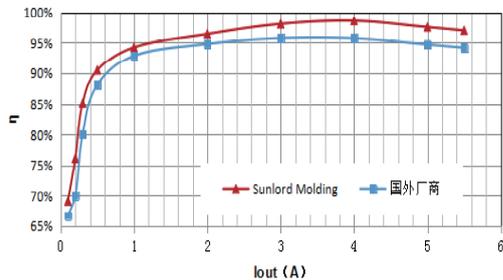


图 14 转换效率对比图

测试条件为频率 $f=2.5\text{MHz}$ ，输入电压 4.5V，输出电压 2.5V，DEMO : LTC3616EUDO，在我们的 CPU 主频越来越高的情况下，稳定供电和滤波是我们主要考虑的，而一体成型电感具有良好的材料特性和特殊设计，电感结构更稳定，阻抗更低，因此具有更高的效率；我司的产品在转换效率方面，比同行产品高 3% 左右。

参考文献

- [1] 黄培云. 粉末冶金原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.9
- [2] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 4

上接 141 页

4 结束语

根据 USM 的特点和运行机理，本文设计了控制 USM 运行速度的整流斩波电路，通过电路仿真验证了该电路的合理性。同时，谐振逆变电路也是驱动电源的重要组成部分，影响着 USM 的运行性能，下一步可对其进行深入研究。随着电力电子技术和控制技术的发展，DSP 数字化控制器也广泛运用于 USM 驱动电源，其高速的数据处理能力和集成的智能控制算法使 PWM 控制信号更加稳定和准确^[6]，因此，该斩波电路可使用 DSP 数字化智能控制器对 PWM 信号进行控制，进一步提升电路的工作性能。

参考文献

- [1] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计 [M]. 北京: 电子工

业出版社, 2004

- [2] 梁大志, 时运来, 朱华, 等. 超声电机驱动及控制技术的新进展 [J]. 振动, 测试与诊断, 2013, 32(6):990-993.
- [3] 孙振华. 基于 FPGA 及 DDS 技术测试电源的设计 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(14): 199-201.
- [4] 于宏业. 高频 DC-DC 数字变换器的相关研究 [D]. 复旦大学硕士学位论文, 2006.
- [5] 高玉萍, 唐伯雁, 李大寨. 实用电源电路设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 蔡光军. 基于 DSP 的高频通信电源的研究 [D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2010.