

采用化学镀铜的高性能3D打印电子产品

Jin Rong Jian, Taeil Kim, Jae Sung Park, Jiacheng Wang, Woo Soo Kim

加拿大西蒙弗雷泽大学机电系统工程学院可伸缩设备实验室

摘要: 本文介绍了3D打印电子元件3D环形空芯电感器的设计和性能验证,它采用了多材料基熔融沉积成型(FDM)3D打印技术和化学镀铜制作。本文研究了不同磁芯形状和绕组数的环形电感器的设计;带有10和13匝绕组的圆形和半圆形磁芯。化学镀铜薄膜确保3D打印的环形塑料结构具有传导行为。当设计变化时,电感可靠地得到证明,应用的源频率为100kHz到2MHz。采用了RL电路来测试所制造的电感器的相位超前特性以及相应的相位角变化。

3D打印技术的出现已成为传统制造和制造方法的革命¹⁻³。3D打印,即所谓的增材制造,不仅赋予个人前所未有的生产能力,还使得行业专业人士能够快速设计原型,而在这方面,使用传统制造工艺(例如机械加工,成型或铸造)制造具有挑战性。然而,尽管3D打印宣称具有各种各样的能力¹³,仍存在严重的局限性,例如3D打印细丝的导电性不足⁴。最近定制电感器设计在功率电子领域备受关注^{5,14}。随着工作频率的不断增加,我们能够看到电路小型化的进一步可能性。然而,由于频率损失,在较高频率下工作的传统电感器设计自身的问题会产生。此外,成本和低效率经常成为电感器使用的阻碍。

本文我们提出了3D打印电子产品方面的下一个电子制造工艺范例。作为一个例子,我们设计并演示了化学镀铜(Cu)膜沉积的3D印刷环形电感器。作为所制造的电感器的性能表现,还讨论了关于不同电感器设计的相位超前行为。

绕组损耗可以理解为由于导体材料中产生的集肤效应和邻近效应。这些不利影响随着频率的增加而变得更加突出,这增加了材料的电阻。为了防止绕组损耗的存在,观察到使用扁平的箔状导体以减少高频电阻的影响。另一方面,磁芯损耗是由磁性材料特性和磁场随频率的变化引起的。两个最普遍的子类别是滞后和涡流损耗。磁芯的就业主要用于补充电感额定值。然而,考虑到较高频率的电感值较小,可以省略磁芯、空芯的存在,以避免在较高频率下不必要的磁芯损耗。

随着频率的增加,电感器的初级损耗主要由绕组损耗和磁芯损耗组成⁵⁻⁸。绕组损耗可以理解为是因为导体材

料中产生的趋肤效应和邻近效应。这些不利影响随着频率的增加而变得更加突出,从而增加了材料的电阻^{6,8,9}。为了防止绕组损耗的存在,使用了扁平的箔状导体以观察减少高频电阻的影响。另一方面,磁芯损耗是由磁性材料特性和磁场随频率的变化引起的。两个最普遍的现象是磁滞和涡流损耗⁵。采用磁芯主要用于补充电感额定值。但是,考虑到较高频率时的电感值较小,因此可以忽略磁芯、空芯的存在,以避免在较高频率下造成不必要的磁芯损耗^{5,7}。

环形允许电感器自含其自身的电磁场,从而消除高频下的电磁干扰问题,与直线电磁铁设计相比,品质因数较低^{5,10}。绕组图案的横截面中,一个电感器具有半圆形(HC)横截面,用于优化高频品质因数⁵,圆形内表面过渡到圆形矩形外表面,而其他电感器设计为圆形(C)交叉截面形状。

如图1(a)所示,通过改变每个圆形和半圆形磁芯电感器上的绕组匝数(10和13匝)来设计四个不同的电感器:C10、C13、HC10和HC13。这四种电感器设计由计算机辅助设计(CAD)软件程序SOLIDWORKS®制备。所有四个电感器都设计成具有 0.23cm^2 的相同横截面空芯面积和相同尺寸;高度为8.5毫米,环形半径为20毫米,电感器壁厚为1.5毫米¹⁵。

设计的电感器是使用同步双材料可印刷熔融沉积建模(FDM)进行3D打印的,FDM依靠的3D打印技术采用了聚乙烯酸(PLA)塑料(用以电感器主体结构)和聚乙烯醇(PVA,作为水溶性载体),这可以实现打印具有桥梁和结构悬垂的坚固复杂物体。

通过定制的多材料可印刷FDM系统——Rostock 3D



图 1 a) 从左到右分别为采用 SolidWorks 设计的 C10、C13、HC10 和 HC13 四个电感器 CAD 图像。b) 采用 PLA 的 3D 印刷电感器设计。c) 聚多巴胺改性的电感器设计。d) 镀有 Cu 的最终制备电感器。

打印机 (SeeMeCNC®), 可建立电感器主体部件。将印刷电感器浸入水中约 2 小时, 以除去水溶性 PVA 支撑材料。然后, 在 35°C 下用聚多巴胺对 PLA 印刷模型改性 3 小时, 使其具有更高的粘合性能, 以形成薄的多巴胺薄膜, 引发并增强它们与铜 (Cu) 离子的粘附性^{11,12}。最后, 将修改后的模型浸入 Cu 离子溶液中 3 小时, 在 35°C 下进行化学镀铜。

进行了三小时电镀的 Cu 薄膜的厚度被制备为约 150 纳米。通过制备两个相同的镀铜矩形板样品, 剥离测试证实了镀 Cu 的粘附性。一个样品是用聚多巴胺改性, 而另一个在化学镀铜工艺之前没有改性。

聚多巴胺改性样品的电导率在剥离后可靠地保持超过 99% 的原始值, 尽管剥离后未改性样品的电导率降低超过 50%。结果证实了具有聚多巴胺改性的 Cu 膜增强了样品的粘附性。这种方法可能会演变为 3D 打印局部配体诱导的化学镀, 用于具有更高分辨率的导电 3D 打印。

Cu 膜表面的薄层电阻用 SRM-232-100 表面电阻率计 (CUARDIAN) 进行评价。所有电感器的平均薄层电阻值范围为 0.70 至 0.91Ω/sq, 这表明可靠的电导。使用两个挤压垫片作为 E4980A 精密 LCR 仪表 (Agilent Technologies) 在 100mA 直流水平的连接点, 可测量每

个电感器的电感值。寄生电容可认为是在 LCR 仪表的连接点之间形成。

对于所有电感测量, 我们将连接器保持平行, 固定距离为 1 厘米, 以解决它对四种电感器性能比较的影响。

如图 3 所示, 四个电感的电感值在 100kHz 至 2MHz 的频率范围内测量。在 100-150kHz 的较低频率下, 电感与频率的趋势似乎在测量的频率范围内保持稳定。如图 2 (a) 和 (b) 所示, 我们认为寄生电容与频率较高的电压成比例地大幅增加的电感的初始减少的原因¹¹; 电容在每个匝 C_{slit} 之间的狭缝处产生, 在每个绕组 C_{wall} 的内壁和外壁之间形成, 而并联电容在水平顶部 / 底部部分和垂直内 / 外壁部分 C_{core} 之间的空心区域中形成。

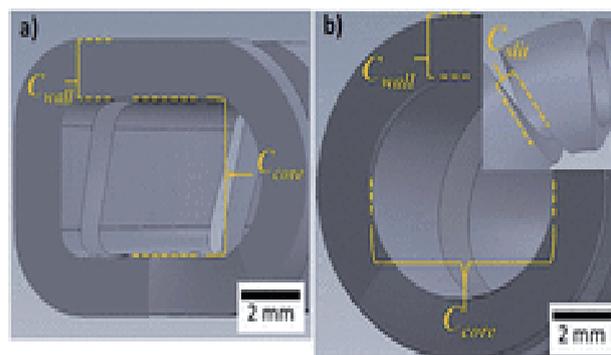


图 2 a) 标记了寄生电容的横截面半圆形电感器的 CAD 设计。
b) 标记了寄生电容的横截面圆形电感器的 CAD 设计。
插图显示每个绕组之间缝隙处的寄生电容。

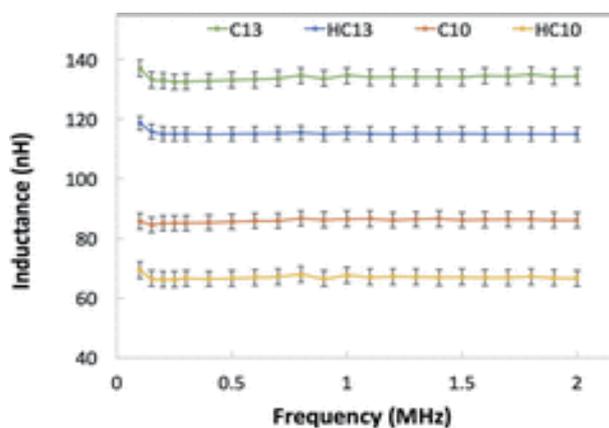


图 3 C10、C13 的电感测量。HC10 和 HC13 电感器采用 E4980A 精密 LCR 测量仪 (Agilent Technologies), 直流电流为 100mA。

因此，电感器的实际电路等效于与寄生电容 C 并联的串联 LR 电路。由于 C_{core} 更多，HC10 和 HC13 最可能具有更大的寄生电容，因为 C_{core} 产生其平行几何扁平磁芯形状。

在 2MHz 时，被观察电感器 C13、C10、HC13 和 C13 的电感值分别为 134.38、92.82、114.95 和 66.71nH。这种趋势与使用 COMSOL Multiphysics 的 100kHz 电感仿真结果一致。可以看出，具有更多绕组匝数的电感器产生更高的电感值，因为更多绕组会产生更强的磁场。根据安培定律，与 10 匝电感相比，增加三匝的电感值预计将增加约 69%¹⁶。从 C10 到 C13 和 HC10 到 HC13 的实际电感增量接近 60%。

略微低于预期的增加可能是由于更多的寄生电容，因为匝数越多，电流越小，而且较长导电路径导致电阻增加。

为了评估化学镀铜电感器，我们使用了电阻—电感器 (RL) 电路以观察由电感器引起的相角的偏移，并将其与串联电阻器—电阻器 (RR) 电路进行比较。频率为 2 MHz 的输入交流电压和 10 伏的峰峰值电压 (V_{pp}) 由函数发生器 (GFG-3015, GW INSTRUK) 提供给电路。使用示波器 (GDS-2012, GW INSTRUK) 在电感器两端测量输出电压波形。如图 4 (a) 所示，电感器显示出相位超前行为。为了利用示波器给出的超前时间量 Δt 计算偏移角 Δθ，使用等式 (1)。

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ \cdot \Delta t}{T} \quad (1)$$

其中 T 是输入波形的周期。四种电感器在 2MHz 处的相移角绘制在图 4 (b) 中，它们的值总结在表 I 中。

所有四种电感器都表明电压超前行为。相移角度的大小顺序为 C13、C10、HC13 和 HC10，而电感水平的量级顺序为 C13、HC13、C10 和 HC10。C10 和 HC13 之间的顺序变化很可能是由于在较高频率下引入的较高寄生电容引起的，半圆截面设计如图 2 (a) 所示。

总之，我们在这里展示了 3D 打印电子设备，其中环形电感器的示例镀有薄 Cu 膜。针对磁芯设计、施加频率和绕组匝数，我们探索了四种不同设计的电感器和 RL 电路行为。13 匝电感器显示出比 10 匝电感器更高的电感。

并且，与圆形电感器 (C13, C10) 相比，由于具备更大的几何寄生电容，半圆形电感器 (HC13, HC10) 显示出更小的电感。使用完善的 3D 打印技术制造电子

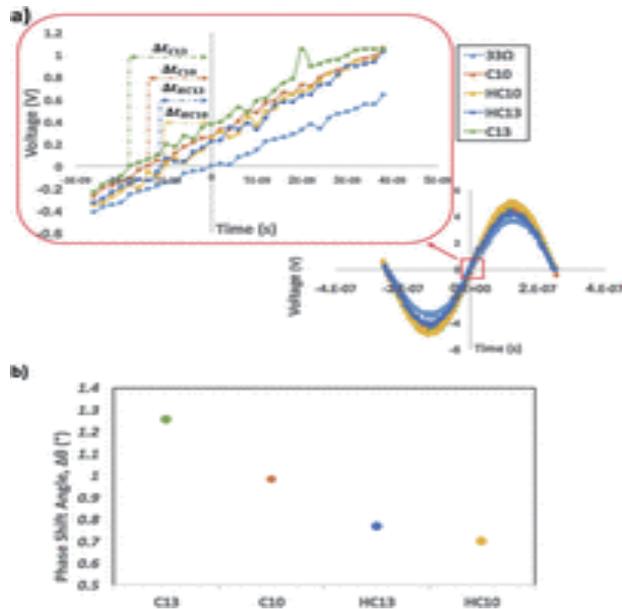


图 4 相移角的测量：(a) 电阻器—电感器 (RL) 电路的电感器 C10 (橙色)、C13 (绿色)、HC10 (黄色)、HC13 (蓝色) 和 33Ω 电阻器 (浅蓝色) 之间测量的输出电压图。(b) 在 2MHz 下测量的电感器的相移角图。

表 I. 用于叠层磁芯的不同材料规格

	C13	C10	HC13	HC10
At 2MHz				
Δθ(degrees)	1.26	0.98	0.77	0.70

元件是一种很有前途的新范例，可以提高未来制造的效率。我们相信所提出的 3D 打印电子器件是用于 3D 打印电子设备的微 / 纳米组装新平台的起点。特别是，尺寸小于 10mm 的高性能 3D 打印电感器可与当前的倒装芯片 PCB 技术兼容。

参考文献

- [1] J. -P. Kruth, M. C. Leu, and T. Nakagaw, CIRP Ann. -Manuf. Technol. 47, 525(1998). [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63240-5), Google ScholarCrossref
- [2] R. Jones, Robotica 29, 177(2011). <https://doi.org/10.1017/s026357471000069x>, Google ScholarCrossref
- [3] J. T. Muth, D. M. Vogt, and R. L. Truby, Advanced Materials 26, 6307(2014). <https://doi.org/10.1002/>

- adma.201400334, Google ScholarCrossref, CAS
- [4] N. Dossi, F. Terzi, E. Piccin, R. Tonio, and G. Bontempelli, *Electroanalysis*, 28, 250 (2016). <https://doi.org/10.1002/elan.201500361>, Google ScholarCrossref, CAS
- [5] C. R. Sullivan, S. Prabhakaran, W. Li, and S. Lu, *IEEE 38th Annu. Power Electronics Specialists Conf.*, Orlando, FL (2007), pp. 1754-1759. Google Scholar
- [6] W. Lundquist, *Power Electronics Technology*, 14-18 (2008). Google Scholar
- [7] W. Liang, L. Raymond, and J. Rivas, *IEEE Energy Conversion Congr. & Expo.*, Pittsburgh, PA (2014), pp. 971-979. Google Scholar
- [8] F. Terman, "Circuit elements," in *Radio Engineers' Handbook* (1943). Google Scholar
- [9] C. R. Sullivan, *IEEE Trans. on Power Electron.* 16, 142 - 150 (2001). <https://doi.org/10.1109/63.903999>, Google ScholarCrossref
- [10] Garza-Ulloa, S. Valadez, and M. Salvador, See <http://lima.utep.edu> for "Electromagnetic Field Toroidal Applications" (2011). (last accessed December 15, 2017). Google Scholar
- [11] T. Aktar and W. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 4, 1855 - 1859 (2012). <https://doi.org/10.1021/am300058j>, Google ScholarCrossref
- [12] S. Ma, L. Liu, V. Bromberg, and T. J. Singler, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 6, 19494 - 19498 (2014). <https://doi.org/10.1021/am506102w>, Google ScholarCrossref, CAS
- [13] R. Zhu, G. Lipworth, T. Zvolensky, D. Marks, and D. Smith, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*. 16, 157 - 160 (2017). <https://doi.org/10.1109/lawp.2016.2563398>, Google ScholarCrossref
- [14] M. B. Shadmand and R. S. Balog, *Power and Energy Conference at Illinois, Champaign, IL* (2012), pp. 1-5. Google Scholar
- [15] B. Chou, J. S. Park, and W. S. Kim, *Proceeding of IEEE MDC* (2015). Google Scholar
- [16] D. A. Ward and J. La T. Exon, *Eng. Sci. Educ. J.* 2, 105 - 113 (1993). <https://doi.org/10.1049/esej:19930034>, Google ScholarCrossref
- [17] A. Garcia, J. Polesel-Maris, P. Viel, S. Palacin, and T. Berthelot, *Adv. Func. Mater.* 21, 2096 - 2102 (2011). <https://doi.org/10.1002/adfm.201100041>, Google ScholarCrossref, CAS

上接147页

会经济与科学技术等方面的综合实力的全面提升, 电力电子技术应用的不断发展, 对电力电子器件性能指标和可靠性的要求也日益苛刻。就实际应用而言要求相关器件具有较高的工作电压、允许工作在更高的温度下、有着更好的散热能力、能适应更高的开关频率, 同时必须具备抗振动、抗辐射、高低温冲击等性能。电抗器同样将朝高频化、小型化、混合磁路、低损耗、水冷、风冷、低成本发展。

本文重点对三相三柱式电抗器进行了系统的研究。具体地, 本文研究内容总结如下:

5.1 完成了相关产品应用分析

通过阐述各种方案磁路的优缺点, 为方案解决提供了理论依据, 在不增加成本和不改变大结构的前提下, 对方案进行了合理的优化, 作业效率有了一个大的提升。对于多匝数产品 (大于 50 匝) 和三相三柱变压器励磁不平衡有了更多的改进方法。

5.2 解决了分数匝在产品中应用

基于分数匝原理, 优化产品铁芯结构, 合理安排铁芯柱气隙厚度, 以使三相感量相对平衡, 产品运行更加可靠。

参考文献

- [1] 尹克宁, 变压器设计原理, 北京 中国电力出版社, 2004. 3
- [2] 王全保, 电子变压器手册, 辽宁 辽宁科学技术出版社, 1997. 10
- [3] 朱英浩, 变压器绕组匝数的基本概念, 变压器, 1991. 11
- [4] 电抗器国家标准 GB 10229-1988
- [5] 半导体电气传动用电抗器行业标准 JBT 9644-1999
- [6] 油浸式电力变压器技术参数和要求 GBT 6451-2008
- [7] JB T7632-2006 《串联电抗器试验导则》
- [8] 陈庆宾, 基于分数匝磁件元件分析, 磁性元件与电源, 2014. 10
- [9] 崔立君, 特种变压器理论与计算, 北京 科学技术文献出版社, 1996. 05
- [10] 陈乔夫, 互感器电抗器的理论与计算, 武汉 华中理工大学出版社, 1992. 10