电磁炉：不同线圈/锅的特性对加热性能的影响

安森美半导体 Dominic Li

全球正广泛采用电磁感应用于烹饪。从现在到2018年，电磁炉市场将以6.83%的年复合增长率发展(据行业分析公司TechNavio)。然而，感应烹饪的方式因不同地区遵循它们独特的发展路径而大有不同。本文将看看准谐振炊具的等效电路和涉及采用不同的锅的材料的线圈特性。

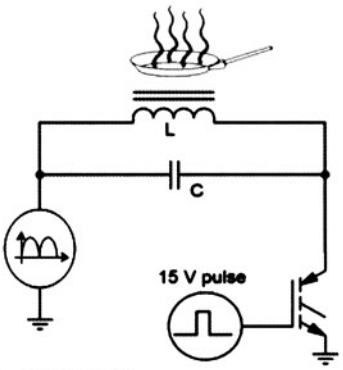

图1 准谐振电路

有几种电磁炉电路拓扑结构，每一种用于世界特定地区。在欧洲，多单元、半桥谐振炉灶正越来越普遍。但在亚洲却不同。例如，每年数百万单个单元、准谐振炉灶被销售给中国消费者，而采用准谐振电感拓扑结构的电饭煲在韩国见证了相当大的市场吸引力。

对于单个单元炉灶或电饭煲电路，通常采用一个准谐振升压电路(如图1所示)。这类电路有较少的元件数。它们通常依赖一个1200V或1350V的IGBT，并可连接到已整流和滤波的120V或240V交流线路。RLC谐振电路连接到整流交流输入，通过IGBT开关。在优先操作模式，IGBT导通，在电感和电容中存储能量。当它关断，电路谐振，电压以正弦方式上升到输入电平以上。当电压环接地时，开关重新导通并再次存储能量。虽然该RLC结构的电感和电容部分在这电路原理图中很明显，但电阻不是那么明显。锅作为磁芯和电感电阻，从而产生负载(或阻尼)电阻。没有锅，电压将升得很高，因为它是非常高电荷的电路。这可能会损坏IGBT。电磁炉会结合一个保护电路，以免受“无锅”情况的损害。

有锅的等效电路在图2中详细说明。如果我们考虑锅的电阻为电路的核心损耗，它将会是与两个LC元件并联。但有些资料显示，将它与电感串联。这转换可用作交流分析，但不适合直流等效电路，因为电感阻抗通常以mΩ计，串联增添20～100Ω显然会改变它。然而，许多仿真采用这样的串联等效(这是后面将显示的图中所给定的)。

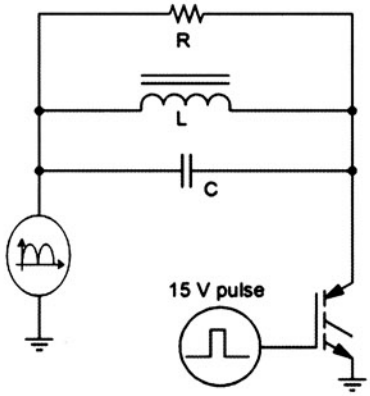

图2 准谐振RLC电路

在等效电路中所看到的阻尼电阻R是由两种不同的损耗机制组成的。这第一个损耗机制源于涡流，这是任何导电材料固有的。此外，如果磁性材料用于锅，那么还要考虑迟滞损耗。目前大多数电磁炉完全采用磁性锅。而适用于非磁性锅的电路开发工作现正在进行中。

涡流及其在电磁炉中的作用

涡流是由不同磁场应用引起的电导体内的环形电流。它背后的原理源于近200年前由法拉第制定的电磁感应定律，即导电线圈磁场密度的任何变化将

在线圈内产生一个电压。临近锅的磁场的变化将在内部产生小电压，由于锅的低阻抗，电流将流过金属。这随后会转变为热能，加热锅中的食物。无论其磁性，在任何导体中都会出现涡流。涡流是集中在导电表面附近，并随离这表面的距离呈指数下降：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu\pi\sigma \cdot f}}$$

其中：δ是集肤深度(以“衡量)，μ(磁导率)=1.257×10^{-6}H/m，σ是导电率。

大多数锅的设计显示它们明显比集肤深度厚。电磁炉锅最广泛使用的两种不锈钢合金是430和304。

对合金430，电阻率(rho)是2.6×106 (1/Ωm)。这说明集肤深度是：

$$\delta_{SS430} = \frac{12.3''}{\sqrt{f}}$$

而对合金304，rho值是1.45×106 (1/Ωm)。所以由此产生的集肤深度是：

$$\delta_{SS430} = \frac{16.5''}{\sqrt{f}}$$

电磁炉中迟滞损耗的作用

迟滞损耗发生在所有磁导率大于空气的材料中。大多数电磁炉需要磁性锅，因为增加的损耗提升电磁炉的整体性能。当施加到磁性材料的磁场增加，然后下降到其初始值，在材料内由此产生的场无法以相应的方式返回到其初始水平。这种差异是迟滞损耗。迟滞损耗由于磁场的重新排列导致产生热量。这种损耗与磁场频率成正比，是通量密度的n次方。关系如下面的方程式所描述：

$$B_h = K_h \cdot f \cdot B_{max}^n$$

其中：B_h是迟滞损耗(W/unit mass)，f是通量频率(Hz)，B_{max}是最大通量值(Gauss)，K_h是迟滞常数(随锅的材料的不同而不同)，n是司坦麦兹指数(也随锅的材料的不同而不同)。

线圈特性

电磁炉通常采用准谐振功率段或半桥谐振电路。无论什么电路，线圈

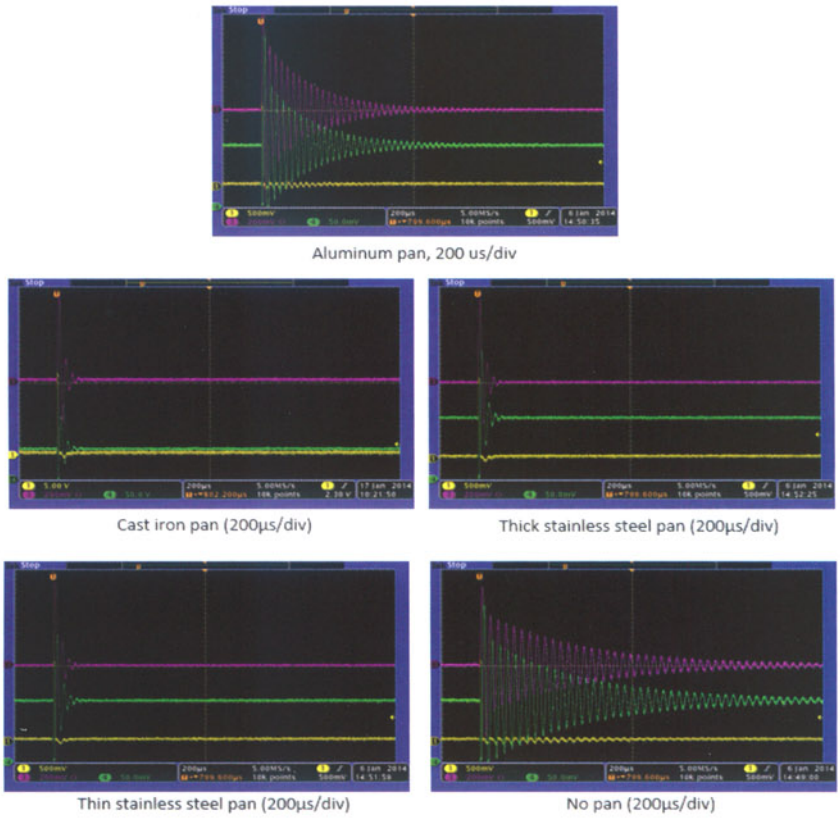

图3　不同锅的材料波形(采用直流电源输入)

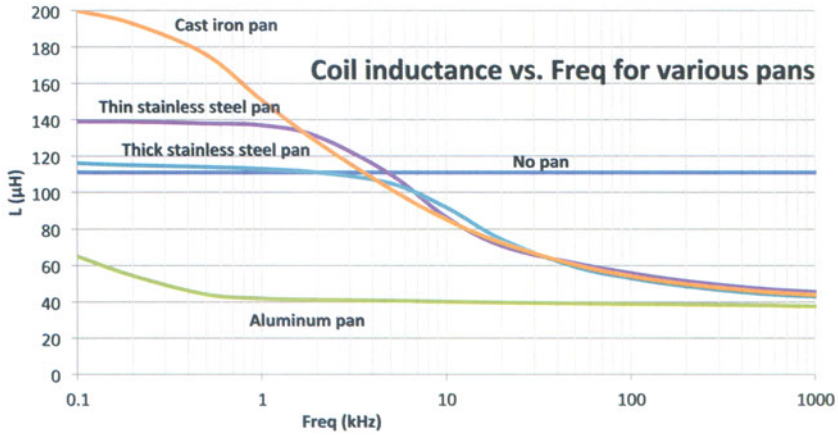

图4　磁性锅及非磁性锅的电感与频率的关系

特性是相同的。高频、高电流脉冲被施加到线圈，产生高磁场，然后被锅吸收并转换为热。正如已阐释的，锅作为LC电路的阻尼电阻。虽然测量电感值和电容值是可能的，但最终的电路复杂得多。锅作为电感线圈的核心，因而改变其参数。

图3中采集的测试数据显示各种不同的锅的材料用于准谐振电路对标准的110μH线圈的影响。置于炊具表面的锅的材料特性极大地影响测得的电感和电阻。在这些测量中的电阻被作为一个串联电阻，可有效地用于交流模型。波形显示不同锅的材料的阻尼效应。没有锅、磁性锅(铸铁和不锈钢)及非磁性锅(铝)之间的阻尼差异可以在单独的屏幕截图中清楚地看到。从这导出图4，显示这每种相同的锅随频率变化的电感变化和损耗。

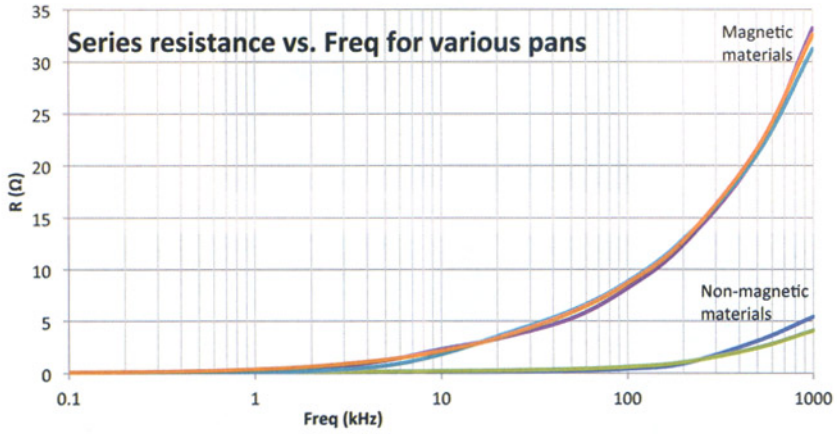

图5　磁性锅及非磁性锅的串联电阻与频率的关系

正如我们所看到的，有两个主要效应导致在感应容器中产生热。非磁性锅可完全由涡流损耗产生热。而磁性锅利用涡流损耗和磁滞损耗。因此，它们为感应烹饪应用提供更高能效。在图5中，磁性锅的曲线相互很接近，明显与非磁性材料的曲线区别开来。此外，线圈的阻抗(实际的和感应的)随锅的材料和电源电路的驱动频率的不同而大大不同。