固态射频能量的设计难点：家庭和工业烹饪应用

The Challenges of SSRFE Design: Residential and Industrial Cooking Applications

Klaus Werner, RF Energy Alliance

过去几年间，在很多市场，用于能量处理和应用的固态（即基于半导体的）射频已逐渐占据了一席之地，并引出了射频能量应用的概念[1-4]。最值得注意的是，各种工业级的加热、干燥、固化、烧结等工艺中，作为能量源的传统磁控管正逐渐被固态射频所替代。

这种技术被采用的主要动力之一是固态功率放大器或许能够用于家用微波炉。每年使用磁控管生产的微波炉产量很可观（超过7000万台），对于固态射频是一个非常吸引人的商业机遇，前提是其系统成本能控制到一定水平，而其中的固态功率放大器的成本现在仍然很高。然而，精准的烹饪设备肯定比基于磁控管的传统再加热单元的客户满意度更高、体验更佳。

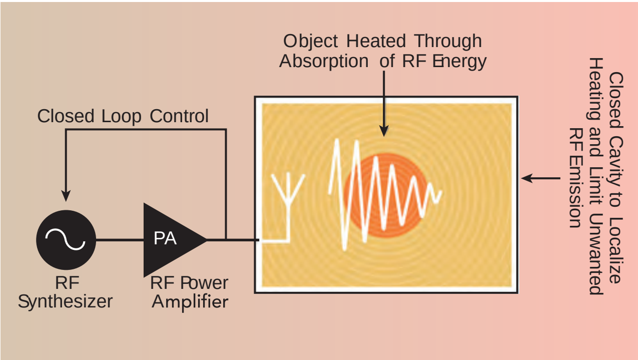

图1： 固态射频能量应用。

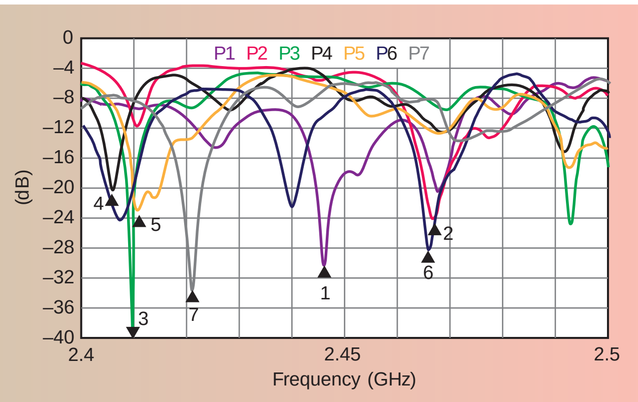

图2： 腔体地平面上负载的S_{11}响应与物理位置的关系。

射频能量联盟（RFEA）已着手解决如何降低系统成本，而如何改善用户对于微波这一新能量源的体验是白色家电公司需要侧重研究的问题。传统的“跳频”磁控管目的是尽可能进行“平均”加热，有时还会通过增加转盘或模式打乱器（mode stirrer）来改善性能、增强均匀性，尽管效果参差不齐。

使用固态技术的系统一下子变得“可控”。这意味着系统控制器不再依赖于“随机”操作源（磁控管）与均匀装置（转盘）的结合，而是需要“知道”并“预测”来自各信道的射频信号的频率、功率和相位差，以达到最佳结果。什么都不动（不改变射频向量）是不可行的！那样只会让烹饪结果变得更糟。因此，纵然新技术的前景十分光明，我们仍需要参透如何向固态能量炊具中引入合适的算法（也即智能）来实现优异效果的奥秘。

笔者曾在《Microwave Journal》[5]（译文见《微波杂志》16年3/4月第46页）上探讨了固态射频加热系统在射频生成上的技术挑战。本文将讨论工业和家用食品加工过程中微波应用的基本概念。固态射频的产生和放大虽然是个新技术，不过并非什么新概念，仍需要继续琢磨如何通过各种操控来收获最好的成效。下面将会为大家介绍这项新技术的一些特点。

射频能量应用主体通常是一个射频密封腔，通过天线接收到射频辐射，其内部放置了待处理的负载（图1）。控制器能够通过所提供的反馈（驻波比）确定辐射过程中腔体/负载的情况，并相应地做出反应。

固态系统处理腔“周围”的信道或者固定功率放大器的数量十分灵活。这一点使得功率可以根据信道数缩放，并能实现独立（每个信道的频率不同）及相干（特定相位偏移的频率相同）的射频驱动。此外，多模腔（高Q结构）的存在使系统设计人员能够主动控制内部

电磁场分布。这点对于烹饪结果至关重要，当然前提是控制器要知道该“做什么”。

显然，我们需要将面向商用和家用的系统设计区分开来：工业用户的负载通常恒定或变化缓慢，大多处于连续流水作业中（如沿着传送带），具有非常高的功率水平（10乃至大于100 kW）。在这种情况下要控制射频功率相对简单，并且想实现足够的能量传递的方法屈指可数。机器通常只进行单一操作，例如巴氏杀菌、烧结、陶瓷和药物干燥等。

面向普通消费者的产品则需要更复杂的功能，如解冻、烘培、炙烤、文火炖煨、真空烹调以及多品种同时处理等等。更何况，这些操作都是批量进行的而并非一个流程，且用户端的操作必须减至最少（毕竟这年头，谁还会做饭？）。这些都使得要全方位适应各种情况变得难上加难。本来，物体在腔体内可处于“任意”位置这一现状就已经带来了巨大的差异。只消移动一下腔内负载的位置，电磁条件就会完全不同（图2）。

烹制目标

简单来讲，烹饪的目的就是在一定时间内，给食品外部乃至内部的指定位置传递恰当的能量。如此一来，这种能量的传递最终可使食品温度升高，还能发生化学或物理反应，从而让我们得以享用美味又健康的膳食。其中，物理反应包括了食物表面的能量吸收、食物内部的热传导、热对流和外部的辐射散热、蒸发散热，还有整个烹饪过程中的参数变化（图3）。无论采用的是何种供能形式，我们的目标都是要让食物均匀地吸收所提供的能量。

物理原理

传统烹饪方法通常是采取将食物浸入受热介质（水、油和热气）或辐射射线（红外线）来获取能量的。红外辐射的穿透深度有限（波长大于780nm的近红外对组织的穿透力小于5mm）[6]；微波加热虽然也属于辐射的一种，但恰恰相反，微波能够穿透到食物深处（可达数厘米）。下面将为大家简单介绍微波是如何对介质进行能量传输的。

微波加热过程原理的表达式为：

$$P_V = 2\cdot\pi\cdot f\cdot\varepsilon_0\cdot\varepsilon'' E^2 \qquad (1)$$

式（1）描述了平均电场强度E、频率f、真空介电常数ε_0与通过微波辐射传递给介电损耗因子为ε"的物质中某一体积元的能量的关系。

所以，在食物内部行进的波所传输的能量由上式所决定，且会沿着传播方

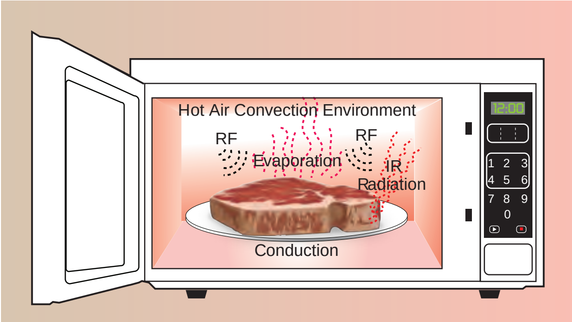

图3：采用热传输机制烹饪食物。

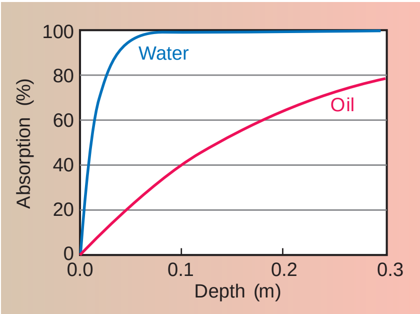

图4：微波辐射在水和油中的吸收深度。

向衰减。根据ε"值的不同，衰减速率也不同。“穿透深度”l_d的定义也与其有关，具体表示为入射场强较表面值减小1/e倍时进入固体的距离。对于ε"/ε'<< 1，该l_d可以近似表示为[7]：

$$l_d = \frac{\lambda\cdot\sqrt{\varepsilon'}}{\pi\cdot\varepsilon''} \qquad (2)$$

我们可以由此计算场强吸收情况，并得到在介质中传播一段距离x后所传递的能量[7]：

$$\alpha(\chi) = 1 - e^{-\frac{2\chi}{l_d}} \qquad (3)$$

图4展示了2.45GHz辐射在水和油中的吸收深度。很显然，微波对油的渗透能力比对水要强得多。

只要知道具体材料的比热容，我们便能够计算出指定区域吸收电磁能量后预计升高的温度。有趣的是，本例中油的比热虽小但受热均匀，而水的吸热集中在一小块区域（忽略材料内部的传导及对流传热），因此水与油上升的温度大致相当。

在前文的讨论中，我们都假定了介电常数ε'和损耗因子ε"是关于频率和温度的常数，然而现实情况并非如此。为了实验的严格准确，我们需要考虑到这个依赖性。例如，清水的ε"随温度变小。高温情况下，水吸收微波的能力会降低。而盐水的情况恰好相反，损耗随温度增大（图5为定性描绘）[9]。真正加热食品时，这会导致“热失控”效应——食物内部本身温度相对较高的点继续升温的速度比周围区域要快，导致明显的受热不均。

电磁波从空气进入介质时，会于界面处发生反射和衍射；反之亦然。这一点和光的传播完全相同，满足的等式也一样。图6表示了空气/水和空气/油界面的情形[8]。水的介电常数为ε'，使得基本上无论由空气进入水面的入射角为多少，都能产生约为60%的高反射率。有趣的是，波在水/空气界面（离开介质）时，不管入射角度为何，都会经历全反射——可以说微波就是被“困”在了水里。

模式分析

家用以及工业加热通常都使用谐振多模式腔来对负载施加电磁场。这些谐振器与所加负载的介电常数一同作用，仅“允许”内部的某些频率

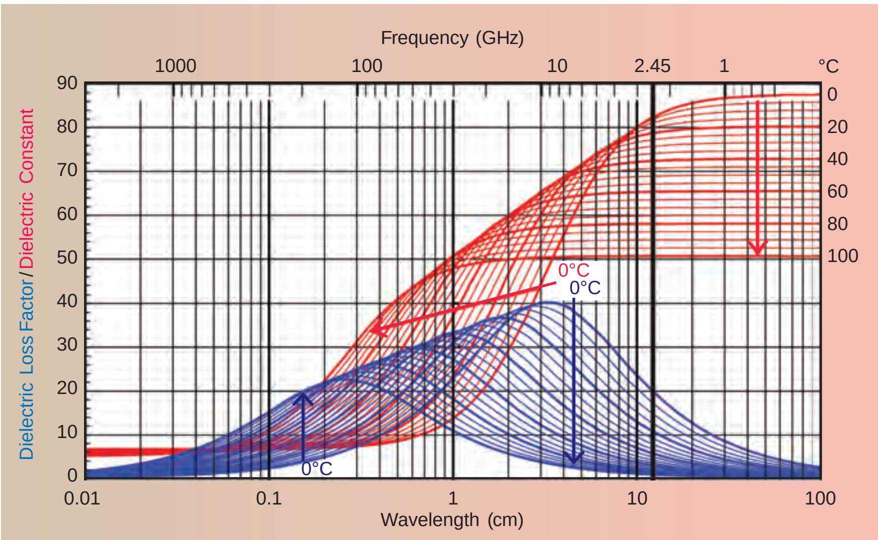

图5：稀释盐溶液的介电常数及介电损耗因子与温度的关系。

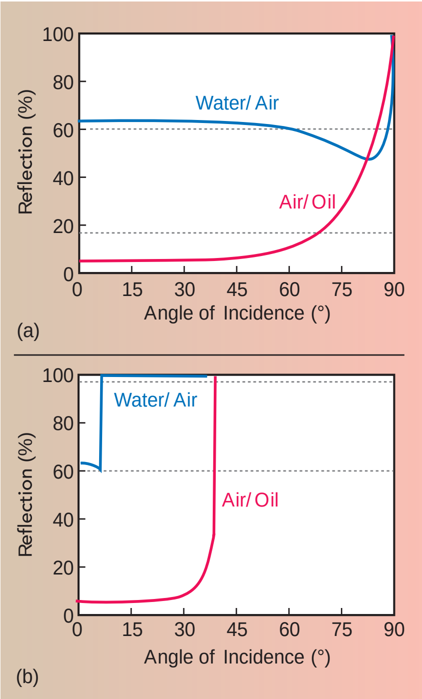

图6：2.45GHz非偏振射线进入（a）和离开（b）空气/油和空气/水界面的反射角与入射角。

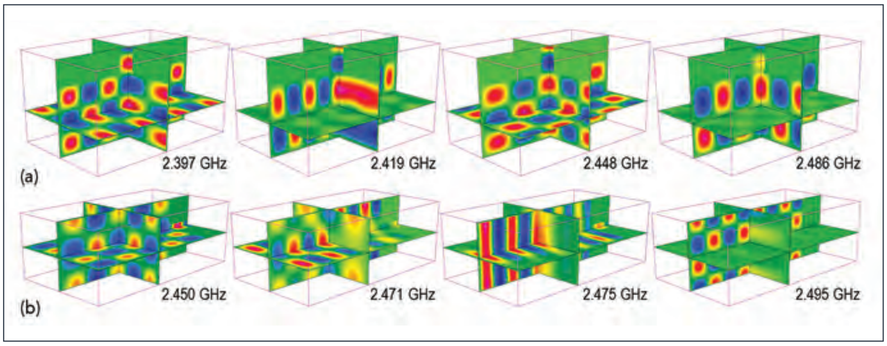

图7：坐标平面中的空双馈矩形腔水平（a）和垂直（b）馈电激励的瞬时电场。

传播，从而产生了特定的电磁能量分布，称为“模式”。与某一特定模式相关的局部能量分布只能将能量传递给那些特殊的耗散点。

显然，为了使负载均匀地吸收所提供的能量，需要在腔内设置多个互补模式，比如通过入射波的频率变化等。图7展现了空矩形腔中不同馈电激励下几种模式的电场分布[10,11]。

较空腔体的典型特征就是模式或谐振清晰可辨（Q值仍然很高）。随着耗散负载的增加，逐渐变为腔体电长度的一部分，同时谐振条件也发生改变。在腔体满载的极端情况下，模谱消失，均匀性可表示为关于穿透深度的函数。

除了腔的模式之外，负载的形状和介电常数也对其均匀的能量沉积起着重要作用。负载的几何形状以及内部和外部反射将产生具有特定场分布的介质谐振器，该分布又取决于外部场分布。图8模拟了在某一特定矩形腔中由两种不同馈电激励的各种谐振频率（此时负载的能量耦合更好）的耗散功率分布情况[11]。可以看出，图像各有不同，有些图样的数量明显占优。这一点可由相应谐振的深度来解释：谐振越深，能量耦合越高，从而图像中的耗散功率值也就越高。

总而言之，微波穿透负载，直接对其内部的体积元进行加热；如此一来，便克服了热扩散这种在介质表面进行能量传递的方式的弊端。不过，事实没有说得那么容易，负载内部仍有许多效应会破坏这种均匀的能量分布：

- 不均匀负载/不均匀介质的（吸收）性能
- 负载的低导热性
- 负载的比热容
- 基于负载温度（解冻/除霜过程中可能产生巨大变化）的损耗因子
- 边缘和角落明显的过热效应
- 发生器模式所造成的能量聚点
- 负载内部谐振
- 表面蒸发（热损失）

解决方案

我们先前说过，烹饪过程的目标是向负载中的任一体积元传递一定量的能量，使其经过一段时间可以达到理想温度。

接下来我们将探讨如下三种不同的负载情况[12]：

1. 微波辐射可穿透负载，吸收率极弱
2. 吸收深度≈负载尺寸/2
3. 吸收深度<负载尺寸/2

第一种情况效果十分均匀，但同时会需要更高的场强以有效加热（参见公式1）。在这种条件下，选择915MHz可能比2.45GHz的效果更好。当然，我们也可以自行选择频率（如果可调的话），使得吸收深度与负载几何尺寸更匹配（见第二种情况）。由于吸收率低，我们需要额外注意射频功率的测量值（前向功率及反射功率）。通常而言，反射、前向的差值即为“传递”了的或者说是“吸收”了的功率。然而，设备的四壁和其它组件也会吸收能量，因此测量数据必须仔细校准，以排除其它的“消耗者”。此外，在这种情况

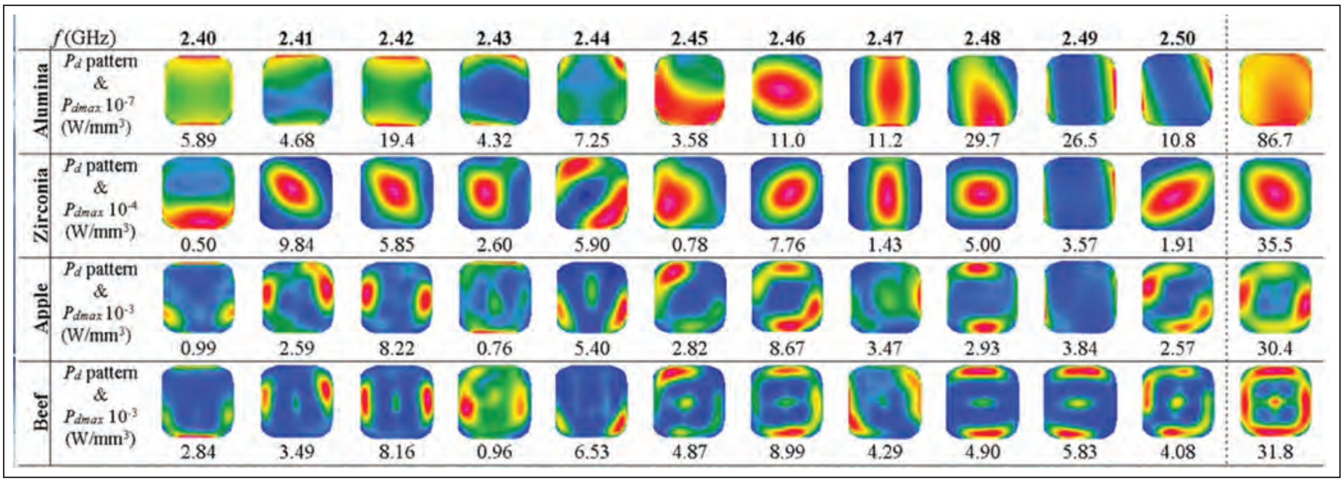

图8：某腔体中各50mm*50mm*10mm负载内的能量沉积与频率的关系。

下，一部分射频功率被反射回发生器，所以我们需要想办法将放大器的驻波比控制在合理范围内。

第二种是微波加热过程的理想情况：微波辐射能量得到了有效利用，也就是说辐射能一下子就被负载全部吸收了。我们在此假设了负载的四周各个方向都可以接收到微波辐射。同样的，这种情况不需要依靠第三种情形里的热扩散来保证受热均匀。为了提高均匀性，应当使用不同场分布的多种模式。根据具体参数不同，可能会出现边缘过热的情况。如果真的出现此种效应，需要采用合适的模式来尽可能消除这一影响。

第三种情况下最难实现均匀性和理想结果。所有的微波能量全被负载的近表层吸收掉了。此时极易发生边缘过热的现象，需要采取恰当的对策，同时整个表面的均匀性也成问题。另外，从负载表面到内部构成了温度梯度，而整块负载需要由其下的热通量来加热。如果热导率低，那么这个过程会极其缓慢，此时使用微波加热也许并不是最好的选择。否则，很有可能会导致表面过热（热扩散慢），水分蒸干。

工业及家庭应用

对于工业界而言，要造出一台完美的烹饪/加工设备似乎并没有那么棘手。通常，系统用到的负载的几何形状、物理及化学性质都十分明确、容易复现、总体一致，且不随时间产生剧烈变化。此外，还会应用温度、湿度、重量等附加传感器来收集数据，供过程控制器使用。如此一来，不论是之前讨论的三种负载情况中的任何一种，系统都能够有针对性地实现优化。

我们可以根据热扩散速度、区域频谱、所需功率、效率需求等相关的吸收特性来选择使用频率（915MHz或2.45GHz）。射频控制力求创建尽可能多的互补模式，追踪所传输的能量，以达到预期升高的温度并监控关键安全参数。利用固态射频发生器，系统设计人员现在还可以选择摒弃有限数量的高功率微波源而采用分布式的射频功率传输方式（如沿着传送带）。后者具备额外冗余和精细调谐能力，能够实现比使用粒度较小的磁控管系统更好的结果（更高的效益）。

另一方面，想研制出一套完美的家用烹饪系统着实是个艰巨的任务。尽管工作频率基本固定在2.45GHz频带左右（915MHz ISM频带并非全世界通用），射频系统的设计还是有许多自定义项目需要选定：与功率水平相关的自由度，射频信道数以及包括了天线端口位置和整体几何形态在内的腔体电磁设计。家用系统面临的一个根本问题就是有无数可能存在的负载：小到几乎没有（或是意外空转）；大至各种吸收率很高的“膳食”，由不同介电常数的原料构成，尺寸重量均有出入。

热空气对流、蒸汽或炙烤部件等额外热源的引入也导致了更多的复杂性。它们的影响同样需要考虑在内。

结语

设计人员如今能够控制并复现加热食品的射频信号参数，因此也肩负起了“摸清该做什么”的责任。从前的话，主角都是不可控、易老化的磁控管，并没有什么变通空间。不过，”摸清做什么最好“绝非易事。这与加热过程的性质和食物的数量、形状、温度、物相有极大的关系，要说现在想要实现理想效果、达到预期体验更困难了也不为过。工业款因为负载一目了然、均匀一致，相对设计难度要简单许多。

鉴于可以想见的诸多不同负载及使用状态，再加上本文中所讨论的各种共存情况，要实现完美的家用固态射频厨具实是难上加难。不过，由于固态射频的高可控性，这类设备的最终成功也是指日可待。■

参考文献

1. M. DeVincentis, G. Hollingsworth and R. Gilliard, “Long Life Solid-State RF Powered Light Sources for Projection Display and General Lighting Applications,” Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S IMS, June 2008.
2. K. Werner and S. Theeuwen, “RF Driven Plasma Lighting: The Next Revolution in Light Sources,” Microwave Journal, December 2010.
3. K. Werner, H. Heuermann and A. Sadeghfam, “The Potential of RF Energy for the Ignition of Microplasmas,” High Frequency Electronics, November 2012.
4. J.F. Bakker, M.M. Paulides, A.H.Westra, H. Schippers and G.C. van Rhoon, “Design and Test of 434 MHz Multi-Channel Amplifier System for Targeted Hyperthermia Applicators,” Int. J. Hyperthermia, March 2010.
5. K. Werner, “RF Energy Systems: Realizing New Applications,” Microwave Journal, December 2015.
6. K. Krishnamurthy, H.K. Khurana, J.Soojin, J. Irudayaraj and A. Demirci, “Infrared Heating in Food Processing: An Overview,” Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, January 2008.
7. M. Mehdizadeh, “Microwave/RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation,” Norwich, N.Y.: William Andrew, 2009.
8. Matthias Rother, Über das Konkurrenzverhalten von Dielektrika bei der Mikrowellenerwärmung, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik, 2010.
9. www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html; with permission.
10. V.V. Yakovlev, “Frequency Control Over the Heating Patterns in a Solid-State Dual-Source Microwave Oven,” IEEE MTT-S IMS Digest, Phoenix, AZ, May 2015, 978-1-4799-8275-2/15.
11. V.V. Yakovlev, Computer Modeling in the Development of Mechanisms of Control Over Microwave Heating in Solid-State Energy Systems, AMPERE Newsletter, Issue 89, pp.18–21, 2016.
12. M. Grüneberg et al., “Mikrowellenerwärmung von Speisefetten und –ölen” Zeitschrift für Lebensmittelwirtschaft 1992.