射频能量系统用于实现新应用

RF Energy Systems: Realizing New Applications

作者：Klaus Werner，射频能量联盟；译者：冯鑫

随着不断提高的性价比，加上无与伦比的对射频信号的精确控制，固态射频技术的实用场合正在扩大至加热和功率传输领域。换言之，这项技术正在渗透那些曾经被认为是不可能的领域，包括基于电子管的系统（例如汽车点火、医疗成像和肿瘤治疗），以及曾被低成本磁控管信号源主宰的高门槛市场（例如商业和消费级微波炉）。

新市场为射频技术直接和间接相关的事业带来了大量机会。另外他们也为目前已成熟的市场如蜂窝基础设施提供了潜在利润增长点。

固态射频能量系统设计所需的工程知识尚未普及，因为射频工程师要么被用于数据传输的“线性放大器”系统束缚住了，要么专注于用于加热的磁控管。而将固态技术产生的射频用于另外的、目前还不太受关注的能量系统的相关设计知识是普遍缺乏的。

本文将涵盖与固态射频能量系统设计有关的一些经济和技术挑战。针对未来三到五年固态功放模块将如何发展，射频能量联盟（RF Energy Alliance）提出了自己的观点。在本文中，射频和微波不必严格区分。

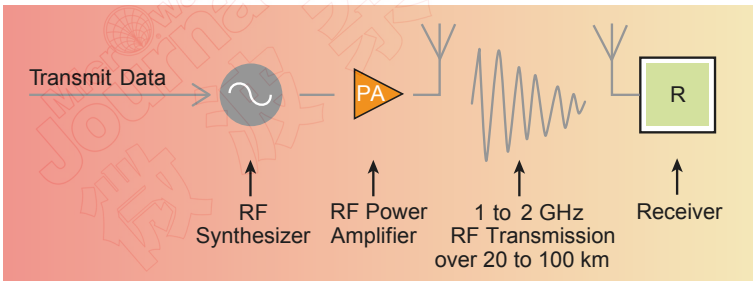

图 1. 一般数据传输框图。

技术背景

所有现代通信——如功率等级相对较低的蜂窝通信、无线电、电视广播、Wi-Fi 和蓝牙—都使用复杂的、高度调制的射频信号，而这些信号都是由固态半导体器件产生和放大的。固态技术由于其可靠性和易用性取代了传统的基于电子管的技术。[1]

固态射频产生和放大技术也能够被用于“驱动”一个本地的化学或物理过程，而不仅仅是传输数据。这就引出了“射频能量”这个相对于数据传输的概念。射频能量应用的例子有工业加热、[15,16] 微波炉、[11,15,16] 射频等离子照明、[4,5] 汽车等离子点火、[6] 微波辅助化学、[17] 癌症治疗 [7] 以及其他。

图 1 给出了用于数据传输的高功率射频信号的产生和辐射的组成模块。图 2 和图 3 展示了射频能量系统的框图。数据传输的一个重要区别是需要高度调制的信号。对于射频能量应用来说更易实现是功放必须工作在“反向关闭”状态下，意味着比工作在饱和状态下的放大器效率要低。射频能量应用通常使用密闭射频腔体，它可以将欲处理的负载包含于其中，天线的能量也辐射到腔体中。相反地，数据传输的射频信号是向自由空间辐射（见图 1）。

真空管驱动的和固态器件驱动的射频能量应用的一个重要区别是反馈的存在与否（见图 2 和 3）。正向和反射功率大小能被轻易地测量；馈入负载的能量大小也能在处理过程

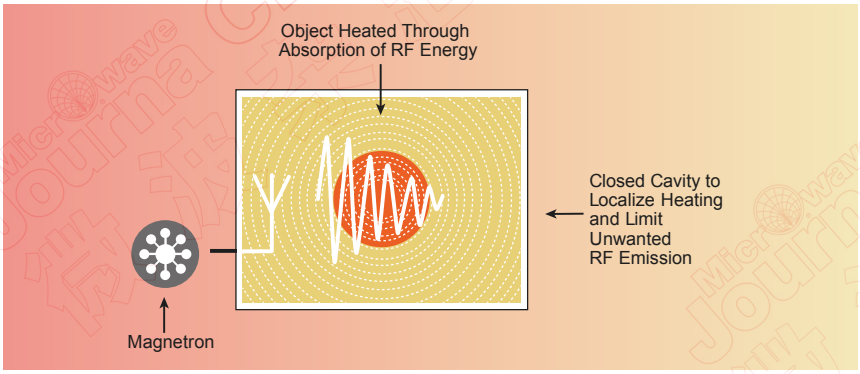

图 2. 磁控管驱动的射频能量应用。

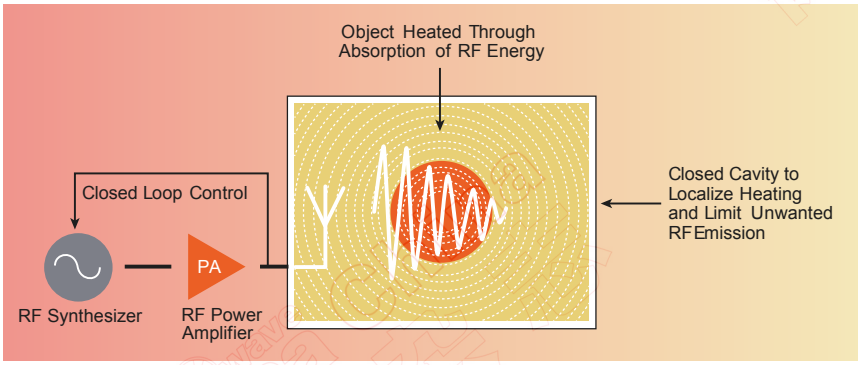

图 3. 固态器件驱动的射频能量应用。

中被立即测量和跟踪。

另一个区别是固态系统有改变频率的能力——通常在 ISM 无证书频带内。应用控制器能够在过程中准确地确定腔体 / 负载条件（即 VSWR），以及能够作出相应的反应。

固态系统在通道数量和过程腔体外围的功放方面要相对灵活一些。这使得功率通过通道数量扩展，以及独立的（各通道频率不同）或相干的（频率相同且具有定量相移）射频驱动成为可能。在多模腔体（一种高 Q 值结构）情况下，系统设计者就有了能够主动地控制内部电磁场分布的选择，但这是一个巨大的技术挑战。

一个完整的固态射频发生器子系统通常包含：

- 小信号发生部分，可选择与微处

南京安崇电子有限公司
www.arance-rf.com
sales@arance-rf.com tech@arance-rf.com
Tel: 86-25-58817997 Fax: 86-25-58072397

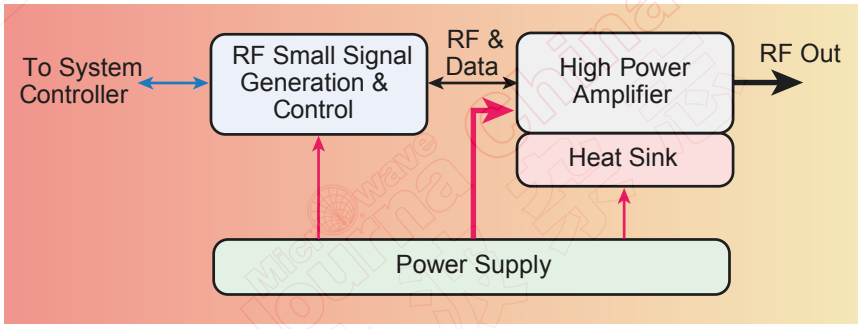

图 4. 固态射频发生器系统框图。

理器置于一处

- 连接至散热器的高功率放大器（主要作为增益部分）
- 供电电源，用于相关电子器件的不同电压和电流供应

图 4 描绘了一个该系统的框图。“RFout”连接端口将射频能量引入到施加区，或者说是一个封闭的环境，它将可以吸收射频辐射的媒质包含于其中并提供必要的电磁屏蔽。

固态射频功率发生器在射频信号的频率、输出功率、相位和“调制”方面具有高度的自由和可控制性。“调制”在这里是指射频信号随着时间和 / 或输出功率的变化的转换（开 / 关），都可快速地在微秒级的时间内完成。而且，前向和反射射频功率的反馈通常和放大器集成在一起；在更复杂的情况下，甚至可以进行相位的测量以得到复 S 参数。

优势

通过前面提到的固态系统在测量、对射频信号参数的高度控制方面的优势和其自身特点，可以总结出其相对于磁控管驱动的系统的可能优势：

- 良好的可重复性
- 功率等级和辐射剂量精确控制
- 强化的过程控制——更高产出
- 发生器具有非常高的可靠性——没有无法预期的停机时间和生产损失
- 在工业和科学系统中没有单个无效点
- 可利用全 ISM 频带
- 动态频率“跳动”和 / 或相位偏移
- 腔体内部能量分布均匀
- 射频能量的高效利用
- 非常灵活的射频信号控制（频率、相位、开关、增益等）
- 快速负载条件反馈用以调谐射频信号和进程（例如避免破坏性电弧）
- 干净的频率源；可以预测的频率跳变，有利于与无线通信系统共存
- 低电源电压——更易保养、集成，更小尺寸
- 与电子设备成本相当

经济性

虽然这项技术的工艺优势很吸引人，但广泛的应用还没有跟上。目前，该技术仅用于医疗和专业领域。工业应用（替代大型磁控管）正在慢慢出现，而消费级应用也在开发当中。[8] 应用缓慢的最主要的原因是成本，以及相关知识缺乏。

射频能量联盟[8] 将在固态射频供应链上和生态圈中的所有利益相关者聚集在一起，并已经开始着手处理这个“鸡或蛋”的问题。该组织作为领导角色首先意识到这个问题并建立了克服障碍的路线图。联盟的工作包括射频能量器件的标准化，

MEDs TECHNOLOGIES

Your Preferred Partner in ASIA

MEDs Technologies focuses on creating values for our partners. With our professional technical sales team and in-house design team, we will be a valuable resources to your company. Our aim is to provide the best value added services in the industry we served.

Processes provided through MEDs

2016 GaAs MPW Fabrication Schedule

Scheduled multi-project wafer fabrication runs

Process	January	February	March
0.15μm LNA	15th		15th
0.15μm PA		15th	
0.10μm PA	20th		20th
0.25μm PA		20th	

Process	April	May	June
0.15μm LNA		15th	
0.15μm PA	15th		15th
0.10μm PA		20th	
0.25μm PA	20th		20th

Process	July	August	September
0.15μm LNA	15th		15th
0.15μm PA		15th	
0.10μm PA	20th		20th
0.25μm PA		20th	

Process	October	November	December
0.15μm LNA		15th	
0.15μm PA	15th	15th	
0.10μm PA		20th	
0.25μm PA	20th	20th	

1. MPW size is 4 x 5 mm, 20 tiles will be supplied.
2. If singular die is needed, layout in the 4x5mm area should be in grid form. Additional cost may apply for Pick & Place into gelpak.
3. The date shown is the Tapeout date and GDSII needs to be submitted 1 week ahead.
4. Interested customers need to book the space one month in advance. Term and conditions apply.

2016 TSMC CyberShuttle Service Plan

Processes: RF HPC Plus (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF HPC (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF LP (1.05V/1.8V); RF HPL (1.0/1.8V, 1.0/2.5V)
Schedule: Jan-20/Feb-17/Mar-16/Apr-20/May-18/Jun-15

2016 AMS MPW Shuttle Service

Process	Technology	Schedule	Schedule
H18	0.18 μm HV-CMOS	Feb-29	May-30
C18	0.18 μm CMOS	Feb-29	May-30
H35	0.35 μm HV-CMOS	Feb-22	May-9
C35	0.35 μm CMOS	Feb-1	Jun-20
C35	0.35 μm CMOS Fraunhofer IIS	Apr-18	Aug-1
S35	0.35 μm SiGe-BiCMOS	Mar-7	Jun-13

Process	Technology	Schedule	Schedule
H18	0.18 μm HV-CMOS	Aug-29	Dec-5
C18	0.18 μm CMOS	Aug-29	Dec-5
H35	0.35 μm HV-CMOS	Aug-22	Nov-7
C35	0.35 μm CMOS	Oct-3	
C35	0.35 μm CMOS Fraunhofer IIS	Nov-21	
S35	0.35 μm SiGe-BiCMOS	Sep-19	Dec-19

Other Available Processes

GlobalFoundries 0.13μm / 0.18μm 7SW SOI processes are available upon request.

上海劢仕电子有限公司 (MEDs上海辦事處)
Website: http://www.meds-tech.com
Email:Zhangxh.cn@meds-tech.com
Tel: +86-21-5674-8687 | Mobile: +86-137-0189-7519

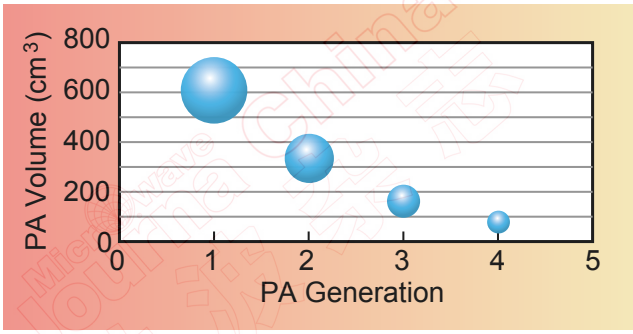

图 5. PA 模块的体积的发展趋势。

例如功率模块以及相关软硬件接口、供电电源集成、冷却系统和整体指标。这将使原始设备供应商（OEM）在知道准确的功能、尺寸、效率和价格等信息后，将精力用在应用开发上。这种策略避免了在“错误”技术上的投资，使得量产的时机更准，也极大的简化了 OEM 的集成工作。理想情况下，标准化带来的易用性会使已有应用和新应用迅速地发展，包括射频照明、医疗切除和车用射频等离子点火。

对于更大规模的市场，已有的应用能从标准化受益。更低的价格、改进的性能和标准化的器件带来有竞争性的前景和更低的门槛，能够在硬件供应商中产生更多吸引力。市场规模值得注意，但不必太过担心：市场够大足以为数个供应商提供生意。OEM 将会需要至少两个供应商的灵活的供应链，那样生产和 / 或质量问题就可以得到缓解，效益提高就更快，商业风险随之降低。总之标准化会带来流畅的转换。

联盟正在最终打磨它的“功放路线图”，其中将规定尺寸、效率、射频输出功率大小、射频功率测量和可靠性、成本目标和可用性，以及其他不同功能。图 5 展示了功放模块体积大小（长 × 宽 × 高）在可预测的未来的发展趋势。纵坐标对应目前可用的最先进的功放模块的体积。我们可以看到尺寸的充分降低，从而使设计者放置功放的自由度极大增强。

有趣的是，功放的成本目标也具有相似的趋势。联盟预测在不远的将来，功放模块的价格将在 12 美元每 300W，并且效率能达到 70%。这个数字现在听起来太过脱离实际，但联盟保留自信并愿意捍卫这一论断。[8]

设计射频能量系统

当涉及到射频能量系统的构想时，系统构架师必须考虑诸如电源供给、热效应、数字接口、微控制器和固件等“常规关注点”，同时还要考虑与射频信号产生、放

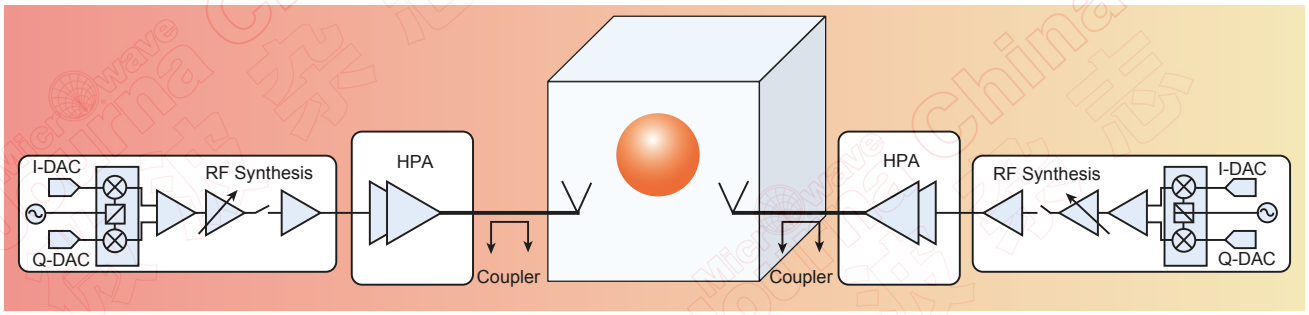

图 6. 双 RF 馈线（即双通道）的施加区原理图。

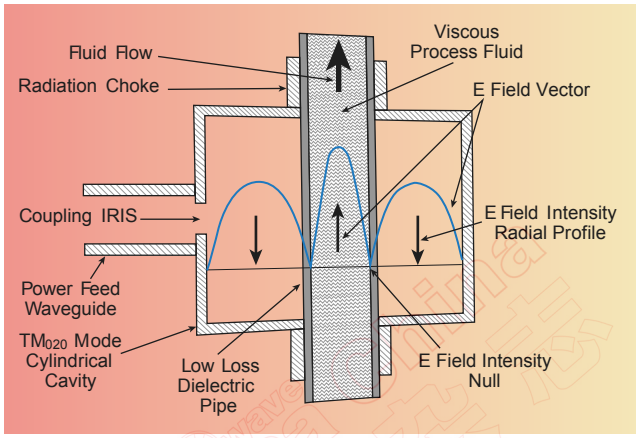

图 7. TM020 腔体用于加热液体[10]。

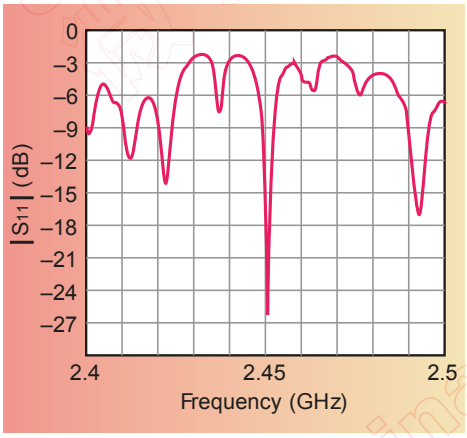

图 8. 空腔体反射损耗随频率的变化。

大、“注入”施加区相关的细节。这里，不同于平常注意点，我们将主要关注射频系统的细节，例如：

- 采用的施加区
- 射频通道数量
- 射频信号产生（频率、增益、相位、分辨率等）
- 所需的总射频功率
- 功放热效应
- 可靠性
- 均匀能量分布
- 实时进程控制

施加区

射频能量系统中的“施加区”是指箱体，或者更通俗的说，是射频给某个负载施加辐射的环境。负载可以是任何物体：但是为了有意义，它要能够吸收全部或至少部分输入辐射。

通常来讲，施加区环境是一个围住负载的金属外壳，从而界定了“实际处理体积”并阻止射频辐射泄漏至外面（见图 6）。射频能量系统正在逼近兆瓦级功率，必须保证良好屏蔽。因为有必要和通信技术诸如 Wi-Fi、蓝牙和 ZigBee 共存，在该指标上还会有更细致的要求。施加区带来一些不同的设计选择、边界条件和工业相关问题。

包围体积 = 腔体

在关心的频率范围内，典型的金属墙壁所包围的体积是用来建立品质因数为 Q 的谐振结构并保持本征模振荡，即驻波模式，这与腔体的几何形状以及入射波的波长有关。[9]

另一方面，腔体宽度大体上不能小于所注入射频信号的波长的一半；在这个截止波长以下，射频能量不能被注入。高于截止波长后，“单模”腔体就形成了，它可以是圆形或者矩形波导结构。根据所选几何形状，横电波如 TE101 或者横磁波如 TM010 模式能被激励，这些可以用于高效能量传输和介质特性的灵敏度测量。举例来说（见图 7），当液体流经腔体中高场强区域时能被迅速地加热，这种情况下利用了 TM020 的施加区。[10]

在频谱的高端，腔体尺寸相比波长来说比较大时：从而引出多模腔体。正如其名称所暗示的，根据腔体几何形状、负载的吸收程度和射频频率，数个模式能够被激励起来。通常来讲，腔体相对波长越大，能形成越多的模式。对一个典型的家用 2.45GHz 磁控管腔，模式的数量在 15 个这一等级。[9]

空腔体谐振发生的频率由下式确定：

$$f_0 = \frac{c_0}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{k}{l}\right)^2} \quad (1)$$

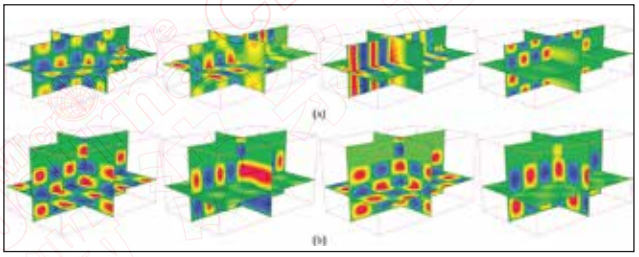

图 9. 由矩形波导中心馈电至侧壁（a）和顶壁（b）的矩形（612×400×300mm³）腔体在 2.35 到 2.55GHz 范围内的四个谐振频率处的实时电场模式图。[14]

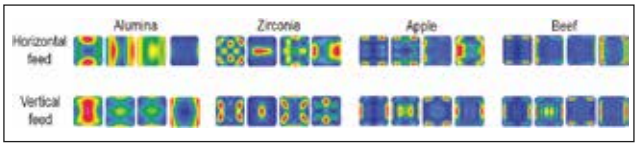

图 10. 通过 FR4 支架置于腔体（见图 9）正中的矩形负载（100×100×20mm³）的中心水平面在 2.35~2.55GHz 范围内的四个谐振频率处的耗散功率模式图。[14]

其中 f_0（Hz）是 TE_{mnk} 模或 TM_{mnk} 模的谐振频率，矩形腔体长宽高分别为 a、b、l（米），c_0 为光速。请注意“双 0”模式不存在以及模式有可能简并（TM 和 TE 模发生在同一频率）。[11]

可靠性

模式的存在也暗示了射频发生器只能将频率和模式相对应的能量传送进腔体——在其他频率，腔体的阻抗未能匹配从而将射频功率反射。这种现象如图 8 所示：对于一个空腔体（无耗散或低耗散负载置于其中），反射损耗随频率在 2.4~2.5GHz 范围的变化揭示了腔体在几个凹陷处才是匹配的。

耐用性对应用于不同场合的各种类型射频功率放大器提出了严苛的要求。放大器必须极其可靠，因为大多数情况下，射频功率可能会被反射。然而，必须通过调节来避免对功率放大器造成破坏。环形器可以用于这个目的。理想情况下，它必须被设计在功放外面以节省成本和减小尺寸。但是倘若没有环形器，功放设计也要足够可靠以经受最坏的 VSWR 情形，这对功放设计以及系统功率控制都是一个挑战。对于单通道系统（只有一个放大器传输射频功率），最大反射功率可达功放自身的输出功率。所需的可靠性指标可能轻松地超过 10:1 的驻波比。这对于最近的 LDMOS[12,13] 和 GaN 三极管技术来说是可达到的。

如果采用多通道系统（多于一个放大器传输功率），反射功率就不再限制在单个功放的输出功率以内；而是与某个功放通过腔体与腔体周围其他的功放的“匹配”有关。需要内建恰当的系统功率控制算法和低功率的（在 PA 处）、快速的保护机制来避免灾难性的故障。

功率放大器数量

前面的讨论假设了“一个”和“多个”功率放大器传输功率进腔体的情况。然而，功率扩展也是一个可行的选择。目前 LDMOS 功率三极管在 2.5GHz 传输高达 300W 的功率且封装极小（2cm²）。以家用微波炉作为参考，三级或四级的射频发生器链路就能达到典型磁控管的输出功率。

总功率总是由处理过程的需求量来决定的。例如，1 千瓦的家用微波炉不是有效的烹饪方式，因为它远超大多数烹饪和加热的需要。限制磁控管的能力也不起作用。大部分时候食物表面变得很热，导致食物太干或者被过度加热。500~600 瓦的功率就完全足够了。此处解冻是一个例外。

有人会指出也许将所有功放的输出功率在外部组合起来或者将数个功率三极管组合在单个功放模块内部更加简单。对于后者，笨重的 7/16 连接器和相应电缆不能够简单地集成起来在住宅中使用。当然，这在工业应用中是一个选择，但仍需对功放内部的高功率传输线结构进行非常精确的设计和加工。然而，使用多个射频发生器的主要原因其实是为了控制腔体内的模式和得到腔体中和负载中的均匀场分布。

均匀性

前面讨论的多模腔体中的模式，通常用于加热、烹饪和烘干过程，它们本身不能在负载中产生均匀的热量。相反，与特定模式相关的局部能量分布只能将能量传输给位于这些点的耗散负载。图 9 给出了一个特定腔体中多种可能模式的电场分布。[14] 在该情形中，场是由实际腔体尺寸和天线开口决定的，相对于用空腔体方程的计算结果更为真实可信。单模不能提供均匀性，但是一系列互补的模式可以。通过调谐多种模式，腔体中的场强可以在某种程度上被扰动从而促使传递给食物的能量变得均匀。负载的形状和介电常数也对均匀性起着很重要的作用（见图 10）。通过频率和相位的改变，我们能清晰地控制腔体内和负载内的能量分布。

我们已经解决了频率捷变性，但是还要在相干驱动系统情况下解决通道间射频信号的相对相位。相干性在这里是指不同通道的射频信号是从同一个本振源发出的，

那么其频率是严格一致的。通道间的相位差变成一个可变的参数。能明显地看出在这种情况下，相位差是实现能量传输优化的必备因素——一个模式的激励需要在不同天线端口“同步”发生。电磁仿真（和测试）结果指出相位上的变化也会影响腔体中的能量分布，从而可以用于加强均匀性，尽管不如频率变化的影响那样大。在那种观念下，一个多通道系统就变得像一个能够进行电扫描的“天线阵”。

那么再回到非相干控制模式（不同通道频率），就需要特别注意交调产物的产生。带外频率应尽量避免除非用屏蔽来解救。并非所有腔体内部的可能模式都会被激励出来，这与不同天线端口的位置有关。模式的独特外形和它在天线开口处的特性也许会不一致。对任何情形，反射损耗扫描（见图 8）都可以使当前腔体 / 负载的条件变得清晰。促进均匀性和有效能量传输（例如低回波损耗）的算法能够被设计出来并用于适当的进程控制。考虑到基于微控制器系统的速度，扫描和算法开发所需时间很少，且不会干扰主进程。

模式或谐振频率清晰的可辨别性是一个接近空载的腔体（高 Q）的典型特点。负载耗散增加会导致腔体的电长度变化从而使谐振条件变化。已有模式会移至较低频率、变宽以及渐渐地完全消失（低 Q），[10] 因为射频信号直接被吸收了，从而没有机会产生驻波模式。在完全加载腔体的极端情形之下，我们得到无模式的频谱且均匀性变成进入负载的穿透深度的函数。低热导率负载内的对流会降低温度变化梯度。

结论

开发新的围绕射频能量应用的工业正面临极大的机遇，并随着开发该技术提供相应的可观数量的工作机会。这项技术是可用的，大量有前途的应用正在开发中，如果进展顺利，我们将很快在日常生活中见到干净的、高效的、可控性良好的、不需接触的和具有选择性的 RF 源。

在一些可能的应用中，并非技术本身限制了其实现，而是我们目前的经济和能力。由射频能量联盟主导的预期的标准化将帮助降低技术门槛以及使得该技术应用可行。

建造那些系统的挑战也有很多，需要对电磁学、控制和应用有相当的了解。总的来说这类应用是具有施加区的射频源与腔体中的不同的负载 / 过程条件之间精细的相互作用。本文涉及的设计内容覆盖了所有种类的射频能量系统。不管是作为车用等离子点火源或是工业加热器，射频源都需要不断地适应腔体 / 负载 / 谐振条件的变化以保持“调谐状态”。■

参考文献

1. F.H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P.B. Kenington,Z.B. Popovic, N. Pothecary, J.F. Sevic and N.O.Sokal, “RF and Microwave Power Amplifier and Transmitter Technologies – Part 1,” High Frequency Electronics, May 2003, pp. 22236.
2. M. Mehdizadeh, “Engineering and Scale-up Considerations for Microwave Induced Reactions,” Res. Chem. Intermed 1994, 20(1), pp.79284.
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_oven.
4. M. DeVincentis, G. Hollingsworth and R. Gilliard, “Long Life Solid-State RF Powered Light Sources for Projection Display and General Lighting Applications,” IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 2008,pp. 149721500.
5. K. Werner and S. Theeuwen, “RF Driven Plasma Lighting: The Next Revolution in Light Sources,” Microwave Journal, December 2010, pp. 68274.
6. K. Werner, H. Heuermann and A. Sadeghfam, “The Potential of RF Energy for the Ignition of Microplasmas,” High Frequency Electronics, November 2012, pp. 38243.
7. 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. Hy-Perthermia, March 2010; 26(2), pp. 1582170.
8. www.rfenergy.org.
9. D.M. Pozar, “Microwave Engineering,” Wiley,New York, 2004.
10. M. Mehdizadeh, “Microwave/RF Applicators and Probes For Material Heating, Sensing and Plasma Generation,” Norwich, N.Y., William Andrew,2009.
11. T.V. Chan and H.C. Reader, “Understanding Microwave Heating Cavities,” Artech House, Boston,Mass., 2000.
12. www.rfmw.com/data/NXP_XR_white_paper_November_2013.pdf.
13. www.freescale.com/training/online-academy/rugged-ldmos-transistors-for-ism-andbroadcast:WBNR_RUGGEDLDMOS.
14. V.V. Yakovlev, Frequency Control Over the Heating Patterns in a Solid-State Dual-Source Microwave Oven, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Phoenix, Ariz., May 2015, 978-1-4799-8275-2/15.
15. R.J. Meredith, “Engineers’ Handbook of Industrial Microwave Heating,” IEE, 1998.
16. J. Thuery, “Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications,” Artech House, 1992.
17. N.E. Leadbeater, “Microwave Heating as a Tool for Sustainable Chemistry,” CRC Press, 2011.