



射频陶瓷片状电容 在射频大功率设备 中的应用

在今天的无线通讯系统中有无数大功率射频设备需要优质陶瓷片状电容。这些设备要求设计者慎重考虑器件功率耗散，最大电流，额定电压，热阻和线路正常工作时的温升等因素。本文着重讨论为这些设备选择电容时的几个最主要因素。

功率耗散

线路设计者必须考虑几个关键因素才能确定一个陶瓷电容在射频功率设备中的功耗。最重要的两项因素是

等效串联电阻 (ESR) 和最大工作电路电流 (I_{max})。为确定一个电容的额定功率，电容的热阻 (Θ_C) 和安装表面的热性能也是不可或缺的因素。本文将讨论所有这些内容。

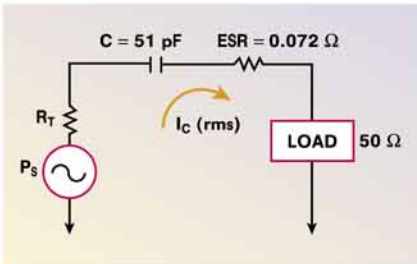
计算均方根线路电流的平方 (I_C^2) 和 ESR 的乘积就能方便地得到电容在射频设备中的实际耗散功率 (P_{CD})

$$P_{CD} = I_C^2 \times ESR$$

ESR 综合了介质材料，电极，终端和终端与电极界面的所有损耗。一个有趣的事实是具有超低 ESR 和高电压击穿特性的电容（例如瓷质电容）特别适合射频大功率应用。

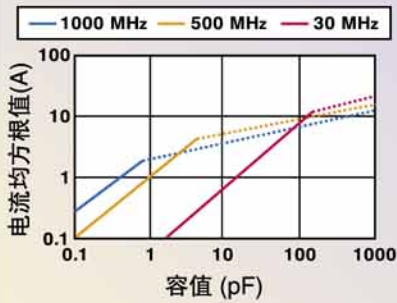
理查德·费奥瑞
射频应用工程部主任
亨廷顿车站市 纽约州 美国

“为了保证射频大功率设备的最高可靠性，要先考察所有线路器件的额定最大功率，电压和电流，所有线路器件的热性能和各种散热方式等因素之后才决定哪个器件能用于线路最后设计。”



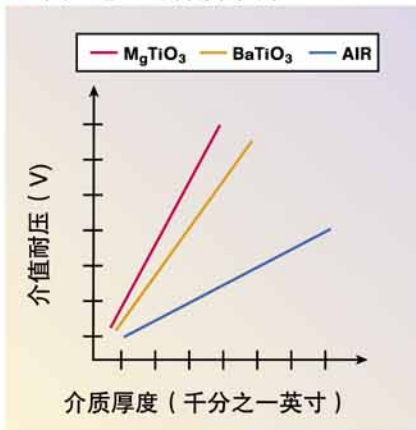
▲ 图1 电流流过有串联损耗成分的电容。

图2 ATC100系列外形B电容的电流 I_C ，容值和频率的关系。



(实线段代表由电压限定的电流 I_{CV} ，虚线段代表由功率耗散限定的电流 I_{CP} 。)

▼ 图3 电压对介质厚度



一个电容功率耗散的例子

以下是一个51pF片状射频频瓷质电容，在移动电话基站功率输出级用作耦合，工作频率900MHz，如图1所示。射频功率60W，系统特性阻抗50欧姆。耦合电容的ESR在900MHz时是0.061欧姆。这个线路中的总射频电流由以下计算决定：

$$I_C = \sqrt{\frac{P}{Z}}$$

$$= \sqrt{\frac{60}{50}}$$

$$= 1.09A$$

所以，电容总损耗是

$$P_{CD} = I_C^2 \times ESR$$

$$= (1.09)^2 \times (0.061)$$

$$= 0.072 W (72 mW)$$

从本例可以看到ESR和电容总功率耗散的关系十分重要。电容内部损耗造成的电功率损失是72mW，即加在电容上全部功率的0.12%。在这类应用中使用低ESR陶瓷电容才能实现这样低的损耗。最近的材料技术进步使更低的ESR成为可能，因此电容功率损耗能进一步减少。

确定电流

制造商以以下两种方式表述最大额定电流：

由电压决定的电流，或者由功率耗散决定的电流。电容值和工作频率决定使用哪种方式来确定额定电流。

如果电容在某个设备中的额定电流(I_C)由电压决定，那么电流值可用额定电容均方根电压和容抗的关系来计算。根据这一关系，在由电压决定的工作条件下最大电流和电容均方根额定电压成正比，和容抗成反比：

$$I_{CV} = \frac{WVDC \times 0.707}{X_C}$$

这里

$$X_C = 1/2\pi fC$$

因此， $I_{CV} = V_{rms} \times 2\pi fC$

当工作频率或电容值增加到一定程度时，由电压决定的电流和由功率耗散决定的电流数值相等。这种情况发生在图2中虚线和实线相交处。在频率高于这个交点时，额定电流完全由功率耗散限度决定。在这个区域中，最大电流按下式计算：

$$I_{CP} = \sqrt{\frac{P_{dmax}}{ESR}}$$

这里 P_{dmax} = 由安装表面的已知热性能算出的器件最大功率耗散。

由此可知，在这个区域里电容最大电流是由电容功率耗散的极限所决定的。不论电容额定功率是大是小，设计者总希望电容的ESR尽量低以便得到尽量大的器件额定电流。

确定电压

电容的最大额定电压主要由介质耐压强度，即介质电压击穿特性来决定。作为一个例子，瓷介质击穿电压通常超过1000V/千分之一英寸，而且在工作温度范围内基本不变。用钛酸钡基($BaTiO_3$)材料制成的介质具有不同的化学成分和微观组成，因而击穿电压较低，见图3。

电压击穿也能在器件外表面发生。这时所加电压和电容终端到终端空气之间的距离相比足够大，因此两终端之间发生跳火。其他造成电容外击穿的因素是电容表面污染和环境原因，例如湿度和尖锐的棱角，特别是在终端上的尖锐棱角。测试介质强度的一个办法是将被测电容浸没在绝缘油中，这样就排除了电容外表终端之间通过空气的跳火。

热阻

为了确定陶瓷电容在一个设备中工作时的额定功率 P_{dmax} ，电容热阻是必须知道的关键因素。知道热流路径长度，温度梯度和垂直于热流的截面面积，就能计算热阻 Θ ，见图4。

如果一个电容的长度是L，截面积是A，那么热阻可以以下式表达：

$$\theta = \frac{L}{4.186\lambda A}$$

$$= \frac{0.2389L}{\lambda A} \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right)$$

导热率λ表示为

$$\lambda = \frac{\text{W}}{(^{\circ}\text{C})(\text{cm})}$$

$$= \frac{\text{cal}}{(^{\circ}\text{C})(\text{sec})(\text{cm})}$$

这里

λ = 所研究材料的导热率系数

L = 传热路径长度(cm)

A = 垂直于传热路径的截面积(cm²)

请注意，用0.2389乘[W/([°]C)(cm)]就把这个单位转换成了cal/([°]C)(sec)(cm)。而且，热导率λ在25[°]C到125[°]C的正常工作范围中是常数。

从上面的公式容易看出，热阻正比于热流路径长度，反比于导热率和垂直于热传导路径的截面面积。这个关系表明电容纵横比，即电容宽度和长度之比在决定热阻时起重要作用，因为电容长度大约就是热流路径长度。算出热流路径首尾温度差，把温度差除以热阻，就得到电容功率耗散。

$$P_d = \frac{T_2 - T_1}{\theta_c}$$

$$= \frac{\Delta T}{\theta_c} \text{ (W)}$$

这里

P_d = 在界面A上的功率耗散 (瓦特)

T₂ = 垂直于热流截面A的温度 ([°]C)

T₁ = 沿热流方向与截面A距离L的垂直于热流截面的温度 ([°]C)

L = 两个截面之间热流路径长度 (cm)

θ_c = 沿电容的热流长度L的热阻 ([°]C / W)

计算陶瓷电容最大功率耗散的热学模型通常包括电容和电容安装表面的热阻。这个模型假设电容主要是通过电容终端和外部引线的传导而散热的。由于辐射和对流的散热作用被忽略，所以仅靠传导的模型算出的最大功率耗散值是有安全系数的。这个模型进一步假设电容终端的热阻与陶瓷介质热阻相比足够小，因而将其忽略。安装表面的效应也予以忽略，计算温升时把它假设为无限大散热器。见图5。

温升

沿热流的轴方向上最大温度变化叫做温升或热梯度。以几种假设为前提把温升表示为射频电流的函数并不总是容易的事。为了得到合理的结果，设计者必须考虑ESR以及电容和安装表面的热阻。

给定一个电容的ESR和电流，就可计算电容的功率耗散P_{CD}和发热。电容热阻和电容外部与散热器的连接也可计算。这样，电容温度比环境温度高多少就可算出。假设散热器无限大，而且电容没有任何瑕疵，则电容温升可计算如下：

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$= \theta (I_C^2 \times \text{ESR})$$

$$= \theta \times P_{CD}(0^{\circ}\text{C})$$

图6是电容功率耗散和电容外壳温度的关系。

热量传输方式

热量可以几种方式传到或离开电容外壳。只有在电容外壳和周边环境温度不同时，才有热量传输。热量传输方式是传导，对流和辐射，这三种方式可以单独或者2种3种同时发生。

热传导

热能以传导方式传输主要发生在陶瓷电容终端区域。这时热传输发生是因为电容终端和线路板表面直接连接。能量以传导方式传输是向温度降低方向，原因是热流路径长度上的温度梯度。

图4 热流路径，热梯度和陶瓷电容终端面积。

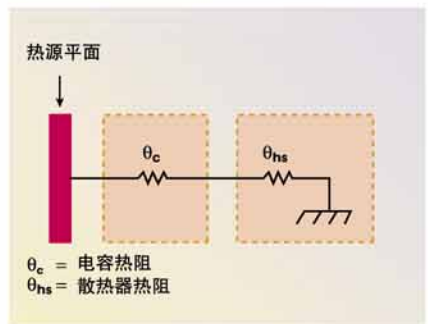
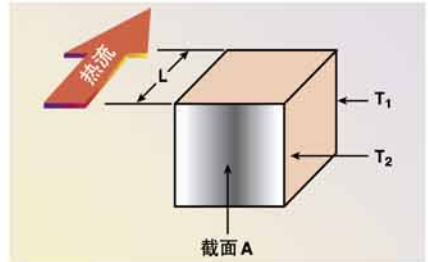


图5 安装在散热器上的电容的热模型。

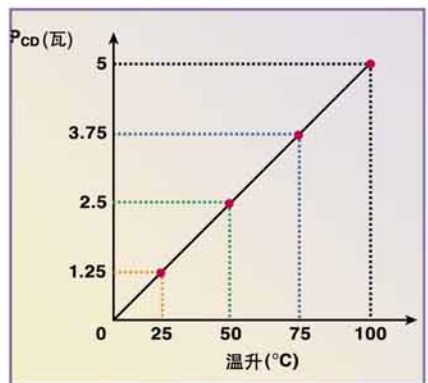


图6 P_{CD}是温度的函数。

在分子量级上，可以把热传导看成能量从能量较高的热状态向能量较低的热状态传输。因此，分子互相碰撞时能量以热的形式从高能分子传到低能分子。这种传输的原因是分子随机运动和分子在热梯度两端之间的相互作用。温度上升时，分子相互作用加剧。这些分子互相碰撞，因此以热的形式传输能量。

根据傅利叶热传导定律，传导过程可以用热通量率方程来定量分析。定律说，通过固态均匀结构物体的热流与以下两者成正比：
与热流路径垂直的截面积，热流路径上单位长度温差。见图7。
因此

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{\lambda A dT}{dx}$$

这里

dQ/dt = 热流率(单位时间内流过某截面的热量)

A = 与热流路径方向垂直的截面积

dT/dx = 沿热流路径的温度梯度

λ = 材料导热率

请注意， λ 前面的负号表示传导热流从高温处流向低温处，也就是和温度梯度反向。

热对流

在固体表面和它周边移动着的空气之间的能量传输通常称为对流。电容介质材料内有扩散或者分子运动，电容周边空气相对电容有运动，这二者相互作用的结合就是对流引起的热传输。对流热传输可分成两种：自然的和强制的。电容表面温度和电容周边环境温度之差产生力，这种力造成空气流动，因此产生对流。

自然对流时空气直接获取和带走热量。因此，是物体(对于我们讨论的情况是陶瓷电容)和它周边环境的热梯度引起空气运动，空气运动引起自然对流。

强制对流下的热流动是冷却风扇之类的外力引起的。强制流动造成的热传输系数一般比自然对流动要大。当有强制空气流动时，自然对流多数可以忽略，因为强制对流提供比自然对流更大的对流冷却效果。

如果一个物体在初始时刻温度高于周边环境温度，牛顿冷却定律用来建立物体温度变化模型。定律说，较热物体冷却速率大致正比于较热物体和它周边环境的温差。就是：

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_A)$$

这里

T = 时刻 t 时的物体温度

T_A = 周边环境温度

k = 比例常数

t = 时间变量(秒)

要解此微分方程需要把 T 置于方程一侧， t 置于另一侧，就是

$$\frac{dT}{T - T_A} = k dt$$

对方程两侧积分，得到

$$\ln(T - T_A) = kt + C$$

解此方程得 T

$$T = e^{kt+C} + T_A$$

从此表达式看出，冷却是一个指数过程，也就是冷却开始时温度曲线下降很快，然后就变得平直。这一特性可以看作是这个物体的热时间常数。这个物体的温度现在可以以时间 t (秒)来表示。在牛顿冷却定律中， t 是变量，而 T_A ， k 和 C 是常数。如要确定给定时间物体的温度，必须得到所有常数的数值。

热辐射

物质发射出能量，再由电磁波或光子传输这个能量，就是热辐射。以对流或传导来传输能量需要有媒质存在，电磁波却无需媒质即可传播，而且在真空中传输热能效率最高。一个理想黑体辐射源每秒从每平方厘米表面，以光子形式发射的总辐射能量正比于其绝对温度的4次方。辐射物体原子和分子中电子结构改变引起这种能量发射。

斯特藩-波尔兹曼定律给出表面辐射能发射的最大热通量。定律形式是

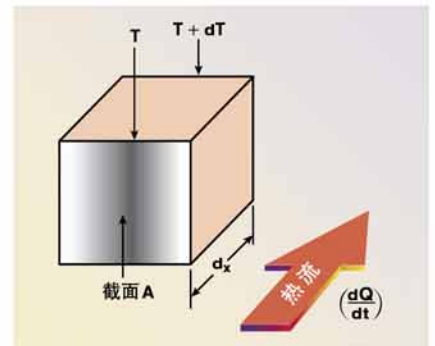
$$E = \sigma T^4$$

这里

T = 温度

σ = 一个常数

从以上方程可以看出，温度轻微上升引起发射的辐射能大增。如果温度加倍，发射的能量增加到16倍。表面发射率是指一个物体的表面相对于理想黑体辐射源能多么有效地发射辐射能。理想黑体发射率等于1.0。物体的一部分表面发射能量时，另一部分表面能吸收一部分被发射的能量。各种材料的表面性质影响被辐射热的多少。



▲ 图7 热流通过固态均匀结构

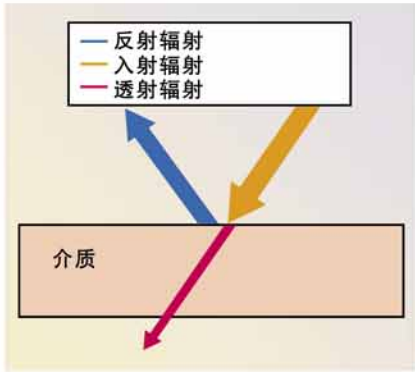


图8 热辐射的分散

辐射源经由单位立体角从单位表面积发射能量的速率被定义为辐射强度。从同一表面发出的辐射在不同方向上有不同强度。沿这一表面法线方向的辐射强度叫做法向辐射强度。

热辐射遇到固态物体时，一部分能量会被吸收，一部分会被反射，还有一部分会穿透物体。入射能量被分成这3部分，各部分的份额多少取决于物体表面发射率和材料密度，见图8。入射辐射被物体吸收的部分是物体的吸收率 α 。入射辐射被物体反射的部分是物体的发射率 ρ 。最后，入射辐射穿透物体的部分是物体的透射率 τ 。辐射能的这3部分的总和是1。因此

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

有关应用的考虑

本文已经重点讨论了为设计射频大功率设备选用线路器件时要考虑的几个重要因素。最重要的考虑与ESR，器件热阻，安装表面特性和散热这样的因素直接有关。这些因素与整个设计的总体发热控制相联系，因此必须仔细考察所有线路元

件以便确定它们在总体设计热负载中的份额。进行以上考虑时的几项准则总结如下。

- 为谨慎起见，应该总是选用超低ESR和耗散因数的电容产品，对于高射频功率的发热控制尤其如此。这样选择可以保证多数设计的正常工作，把设备中发热减到最低。

- 电容安装表面和散热器的热阻要越小越好。因为热主要由电容终端传导到线路板的金属接触点上，所以分析所有有关材料的导热率，和线路板上导体尺寸和接触点的材料厚度这类特性在设计过程中十分重要。

- 大部分热经过电容终端传输，使用像银质微带引线带这样的外部引线可以进一步改善陶瓷片状电容的热传输路径。带状引线能更有效地使热从电容流走。引线也可消除机械应力，特别是在电容和电路板材料热膨胀系数相差太大时十分有用。为适合这种用途，银质引线尺寸是按照电容外形宽度制作的。

- 对整个线路设计的总体发热控制必须审慎评估。一个设备中像功率场效应晶体管，有源增益线路，和其他无源元件在工作时都是附加热源，因而使设计模块的总体热负载加大。确定最后设计方案时必须注意考虑所有热源的影响。

- 电容组的额定电流和功率大大高于单个电容。用坚固的瓷介质电容作为单个元件可以做成各种组合的电容组。电容组大大扩展了容值和对电流及电压的耐受能力。例如，两个等值电容并联得到大约一个电容ESR的一半，所以能耐受事实上两倍电流，这个优点是不可忽略的。

结论

器件最大功率，最大额定电压电流，所有线路元件的热特性和各种散热方法，这些因素需要先审慎评估然后再决定把哪个元件用到产品最后设计方案中去，非如此不能确保大功率射频设备的最高可靠性。而且，选用陶瓷片状电容时，为谨慎起见，要先判断这个电容在设备工作频率下的ESR。设计者有了ESR和网络阻抗以后就能很快计算电容功率耗散。这种考虑对于线路所用电容以外的所有其他器件同样重要。正确的设计方法十分强调发热控制，因为这样作有助于保证设备工作时效率高，无故障。

ATC产品销售按美国技术陶瓷公司文件(文件号#001-992 Rev. A 10/03)中的销售规定与条件办理。如顾客索要, ATC会提供这些规定与条件。顾客也可到ATC网站阅读这些规定与条件: www.atceramics.com/aboutatc/terms_conditions_sales.htm

ATC 尽最大努力提供尽可能准确的信息。对于读者使用以上信息的后果, 和使用以上信息导致影响第三方权利, ATC 不负责任。ATC 保留不事先通知就修改本资料和变更产品的权力。

© 2000 ATC保留所有权

ATC # 001-942 Rev.C; 4/05



A M E R I C A N

ATC North America
631-622-4700
sales@atceramics.com

T E C H N I C A L

ATC Europe
+46 8 6800410
sales@atceramics-europe.com

C E R A M I C S

ATC Asia
+86-755-8366-4318
sales@atceramics-asia.com



www.atceramics.com