

如何确定陶瓷多层电容的热阻， 功率耗散和额定电流

by F. M. Schaubauer and R. Blumkin
American Technical Ceramics

Reprinted from RF Design Magazine,
May/June and July/August, 1981



A M E R I C A N T E C H N I C A L C E R A M I C S

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

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

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

 THE
ENGINEERS'
CHOICE™
ISO 9001 REGISTERED

www.atceramics.com

引言

本文提供的资料使线路设计者能计算任何多层电容*的温升。电容温升计算方法和普遍用于晶体管的算法很相似。

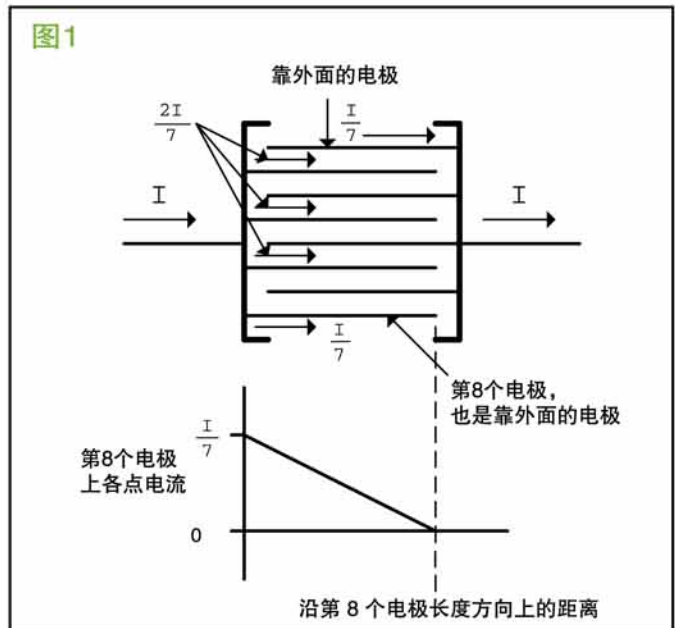
按照理论来计算电容由于交流电流流过的温度升高较为困难。电路设计者要计算就需要电容的等效串联电阻（ESR）和热阻这类参数，而电容制造商往往不提供这类参数。

如果知道等效串联电阻ESR和电流，功率耗散和电容生热就可以计算温升。有了电容生热数据，再加上电容热阻和电容与散热器的外部连接方式的知识，就能计算电容相对于周围环境的温度升高。

电流在片式多层电容内分布是不均匀的，因为最靠外的两个极板（电极）比里面的电极承载的电流小。图1画出了这个有8个电极的电容。如图所示，两个相邻极板组成一个分支电容，共有7个分支电容（因为N个极板组成N-1个分支电容）。如果流入电容总电流是I，每个分支电容就分摊到 $I/7$ 的电流。对于最外边的电极， $I/7$ 就是它实际承载的电流。对于里面的电极，每个电极承载两个分支电容的电流，所以每个电极的电流是 $2(I/7)$ 。而且，在同一电极上不同位置电流不同。对于第8个电极，电流在左侧终端处为 $I/7$ 而在右侧开路处为零。电流分布大致如图1所示。由于这种电流分布，电容内部发热不是均匀分布的。

对于实际的多层电容，电极和终端之间有连接电阻，这也造成发热。这个发热效应强弱取决于电容制造质量。有些较差的制造方式导致很高的连接电阻，另一些较好方式得到的连接电阻低得无法觉察。

本文假设电容制造得毫无缺陷，因此连接电阻为零；还假设两相邻电极之间介质层厚度上温差可忽略，即小于 1°C 。



以上假设的可行性曾经以试验验证，做法是对不同容值在30MHz频率下测量等效串联电阻和温升与射频电流的关系。

电容射频电流额定值确定

确定最大电流有两个标准。第一个标准是电容额定工作电压，讨论如下。这个电压产生的射频电流是：

$$I_p = \frac{V_{\text{peak}} - V_{\text{DC}}}{X_C} \quad (1)$$

这里 I_p = 峰值射频电流

V_{peak} = 电容额定工作电压

V_{DC} = 电容两端直流电压

X_C = 工作频率下电容的电抗

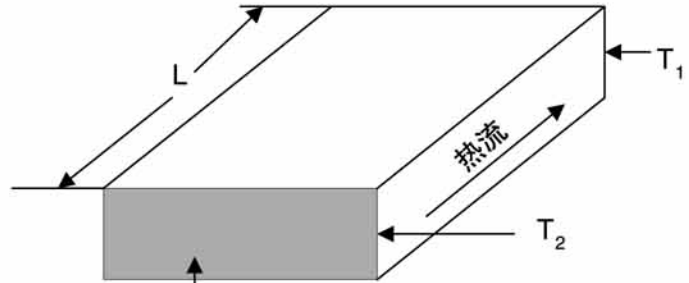
*美国技术陶瓷公司制造的电容

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

射频电流一定不能高于**方程 (1)** 的数值。

第2个标准是功率耗散允许的温升（将在以下段落中讨论）。多数线路中，多层电容是用锡焊接到线路中或者用导电环氧树脂固定就位。因为通常用于电容终端的焊锡的最高温度是190℃，所以选择125℃作为一个系列电容产品*的最高温度。这样就保证电容温度不超过环氧树脂或焊锡的软化温度。然后，这个温度就决定最大功率耗散，如果知道电容等效串联电阻ESR，从最大功率耗散就决定最大电流。

图2



这里

截面积 “A”

A = 垂直于热流的截面（平方厘米）

P_d = 面积 “A” 上的功率耗散（瓦）

T_2 = 截面 “A”（垂直于热流）温度（℃）

T_1 = 距截面 “A” L 距离处的截面上温度（℃）

L = 两个截面之间路径长度（厘米）

Θ = 长度为 L 的路径的热阻（℃/W）

额定工作电压确定

最大额定电压的标准取决于电容的电压击穿特性。击穿电压额定值通常是实际内部击穿电压的一小部分。对于一个陶瓷介质电容系列**，介质每个单位厚度（0.001英寸）击穿电压是1000V/0.001英寸，而且完全不受温度影响。其他介质，如钛酸钡和许多NPO材料，击穿电压就低得多。

有时起决定作用的是表面击穿电压或者叫引起空气跳火的电压，而不是电容内部击穿电压。这种情况下，由跳火决定额定工作电压。影响跳火电压的因素包括表面空气路径长度，表面污染程度和环境条件。

功率耗散决定的额定电流

对多层电容作热分析之前，最好先复习一下基本热学原理。

传热

象电学中从电压和电阻计算电流的欧姆定律一样，热学中从温差和热阻计算热流（传热）的定律是（见图2）

$$P_d = \frac{(T_2 - T_1)}{\Theta} \text{ (瓦特)} \quad (2)$$

这里 P_d 相当于电流，
 $(T_2 - T_1)$ 相当与电位差，
 Θ 相当于电阻。

热阻

一种材料的热阻和单位可以这样计算：

$$\Theta = \frac{L}{4.186KA} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (3)$$

这里

K = 材料导热系数 [克 卡/(℃)(秒)(厘米)]

L = 传输路径长度 (厘米)

A = 垂直于路径的面积（平方厘米）

注：如果导热率单位为瓦/(℃)(厘米)，把导热率数值乘 0.2389就可将导热率单位改成克卡/(℃)(秒)(厘米)。

* ATC 100 系列

**ATC 陶瓷介质电容

AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

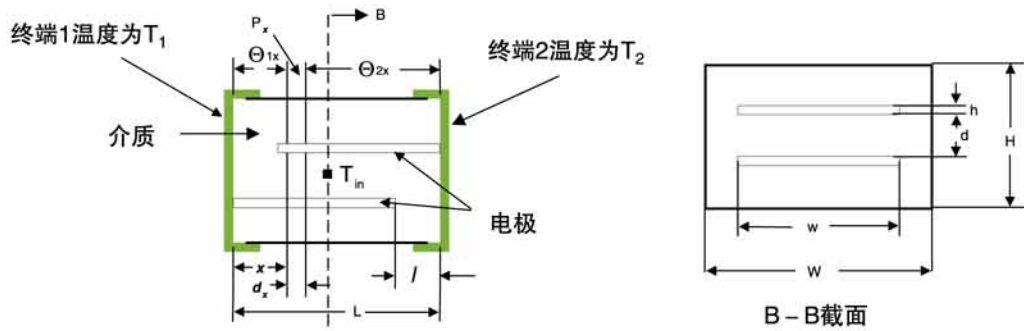
ATC Europe
+46 8 6800410 • sales@atceramics-europe.com

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

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

图3



计算多层电容功率耗散，要建立可用的热学模型，为此对计算加以下限制：

- a) 终端热阻可忽略。为使终端热阻低到可忽略，需要选择合适终端材料，控制其厚度，终端金属分布均匀，制造过程要控制严密。
- b) 传热方式有传导，辐射和对流3种。计算时假设电容所生热只经过传导，也就是经过电容终端到外接引线或基板上的金属传输线被移走。忽略不计辐射和对流。这个限制给算出的额定电流提供了附加安全系数。
- c) 在25到125℃温度范围内导热率为常数。

因为多层电容里面有多个平行的传热路径，所以它的传热线路图很复杂。由于电流值在电容长度方向上有变化，电容内功率耗散不集中在任何一点上，而是分布在整个电容长度上。为简化这种复杂情况，推导了一个热等效线路。热等效线路是一个位于电容中心平面的集总的功率耗散源（也就是生热器）和每个电容终端与中心平面之间的一个集总热阻，电容有两个终端，从中心平面到每个终端各有一个集总热阻。

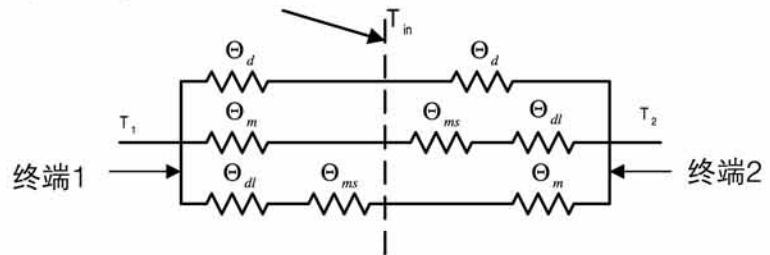
图3画出了推导有两个电极的电容的热等效线路。从终端1向右X距离处，

取一个宽度 d_x 的窄条。两个电极上这个窄条范围内的功率耗散表示为 $i^2 R_x d_x$ ，这里 i 是在平面 x 处电极内电流， R_x 是电极单位长度的电阻。在窄条内介质材料内的功率耗散可以按类似办法用耗散系数和电流来计算。

介质材料的耗散系数在 x 方向是常数。窄条 d_x 上功率耗散总和叫 P_x ，是上述电极耗散和介质材料耗散的和。从窄条到两个终端的热阻 Θ_{1x} 和 Θ_{2x} 包括平行的电极和介质材料路径，按以下方法计算：

图4

生热（中心）平面



- Θ_d = 介质从生热平面到终端的热阻 (°C/W)
- Θ_m = 电极与所连接电容终端之间热阻并连总和 (每个电极从生热平面到所连接电容终端的长度 $\frac{L+\ell}{2}$ 上的热阻，这些电极互相平行。) (°C/W)
- Θ_{ms} = 电极与不连接电容终端之间热阻并连总和 (每个电极从生热平面到不连接的电容终端那个边缘的长度 $\frac{L+\ell}{2}$ 上的热阻，这些电极互相平行，总和起来)(°C/W)
- Θ_{dl} = 介质热阻并联总和 (每个电极边缘和不连接终端之间的长度 ℓ 的介质热阻) (°C/W)
- T_{in} = 生热平面温度 (°C)
- T_1 = 终端1温度 (°C)
- T_2 = 终端2温度 (°C)

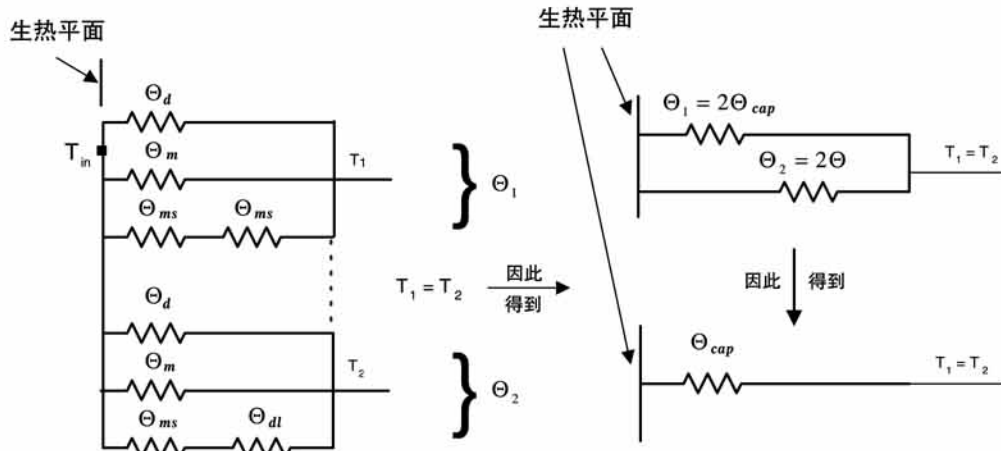
AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

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

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

图5



$$\text{这里 } \Theta_1 = \Theta_2 = 2\Theta_{cap} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Theta_d}\right) + \left(\frac{1}{\Theta_m}\right) + \left(\frac{1}{\Theta_{ms} + \Theta_{dl}}\right)} \quad (4)$$

$$\Theta_{cap} = \frac{\Theta_1 \Theta_2}{\Theta_1 + \Theta_2} \quad (5)$$

Θ_{cap} = 从发热平面到两个终端的电容热阻 (°C/W)

$$\Theta_{1x} = \frac{x}{4.186KA} \quad \text{或} \quad \Theta_{2x} = \frac{L + l - x}{4.186KA}$$

如果把终端1和2作传热连接，而不是电气连接，终端1和2的温度就相同了。这样，电容内平面x处的温升可以用下式计算：

$$\Delta T_x = P_x \frac{\Theta_{1x} \Theta_{2x}}{\Theta_{1x} + \Theta_{2x}}$$

这里

ΔT_x = 以 T_1 或 T_2 为参照的温升 (°C)

$$\Theta_{1x} = f_1(x)$$

= 从平面 x 到 终端 1 的热阻 (°C/W)

$$\Theta_{2x} = f_2(x) (L + l - x)$$

= 从平面 x 到 终端 2 的热阻 (°C/W)

$$P_x = f_3(R_x, x, dx)$$

= 在平面 x 位置的宽度为 dx 的窄带范围内金属电极和介质耗散的功率

如果对 ΔT_x 积分，得到以下表达式：

$$\Delta T = f \left(P_d, \frac{\Theta}{2} \right)$$

这里

Θ = 从中心平面到终端1和终端2的热阻 (°C/W)

P_d = 电容内耗散的全部功率 (瓦)

所以

ΔT = 中心平面相对于终端的温升 (°C)

根据以上数学推导可以画出表示中心平面处所有耗散功率和从中心平面到两个终端的热阻的等效线路。

电容器在中心平面两侧对称说明热阻等效线路是合理的。电容功率耗散和电容热阻分布也有这个对称性。

图4是图3中双电极电容的热等效线路。从图4可以看出，有两个相等的传热路径从中心平面分别通向两个终端。每个路径各有3个热阻互相并联。第一个是金属，第二个是介质，第三个是金属和一小段（长度 l ）介质串联。

AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

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

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

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

第一和第三项中热流通过的截面积是电极截面积 (wh)，第二项中热流通过的截面积是介质截面积 (WH - 2wh)。当电极数目是N时，上述两个截面积变成 Nwh和(WH-Nwh)。

如果把终端1和2热连接，而不做电连接， T_1 就等于 T_2 了。这等于把图4的传热线路图在生热平面处对折，使终端1和2连接。因此，电容热阻可以表示如图5。

使用图5等效线路和方程3, 4和5可以计算ATC100A系列1.0pF和100pF, ATC100B系列1.0pF, 100pF和1000pF电容的热阻，结果见表1。

额定功率确定

如前所述，可容许的功率耗散由以下因素决定：热阻 Θ_{cap} ，电容等效串联电阻ESR，电容内部容许的最高温度，终端上的焊锡和环氧树脂能承受而不损坏的最高温度。图6是简化的电容热线路图，前提是电容的两个终端都连接在无限大散热器上。图6中线路的热方程是：

$$\Theta_{cap}(P_d) = (T_{in} - T_1)$$

方程的曲线在图7中给出。如果把垂直刻度名称从功率耗散 P_d 改成允许功率耗散 P_{da} ，这个曲线就真成了电容最大额定功率曲线，允许的电容内部温度 T_{1max} 等于125°C。

Θ_{cap} 从电极和介质尺寸算得的电容导热率						
系列	100A			100B		
电极						
容值(pF)	1	100	1	100	1000	
N=电极数目	2	28	2	18	62	
$L_{(cm)}$	0.1			0.22		
$l_{(cm)}$	0.04			0.06		
$A_m (cm^2)$	0.00006			0.000141		
$N A_m (cm^2)$	0.00012	0.00168	0.000282	0.02538	0.00874	
K_m	0.167 gm cal/(sec)(°C)(cm)					
$\Theta_m (°C/W)$	1670	120	1420	158	46	
$\Theta_{ms} (°C/W)$	715	51	812	90	26	
介质						
$L + l (cm)$	0.14			0.28		
$A_{cap} (cm^2)$	0	.02	0	.07		
A_d	0.01988	0.0183	0.06972	0.06746	0.06126	
K_d	0.03 gm cal/(sec)(°C)(cm)					
$\Theta_d (°C/W)$	28	30	16	16.5	18	
$\Theta_{dl} (°C/W)$	5310	380	3390	376	109	
电容						
电容 $\Theta_{cap} (°C/W)$	13.7	11.4	7.9	7.2	5.9	

表1 下标d = 介质 下标m = 金属电极
前述方程 3, 4, 5 用于此处计算

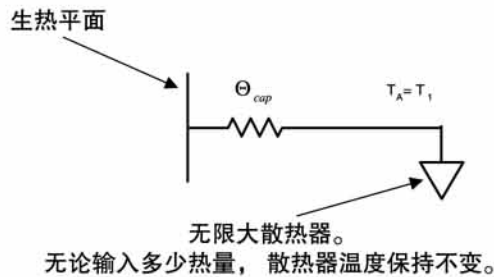
$$\Theta_m = \frac{0.5(L+l)}{4.186K_m \left(\frac{NA_m}{2}\right)} \quad \Theta_d = \frac{0.5(L+l)}{4.186K_d A_d} \quad \Theta_{ms} = \frac{0.5(L-l)}{4.186K_m \left(\frac{NA_m}{2}\right)}$$

$$\Theta_d = \frac{l}{4.136K_d \left(\frac{NA_m}{2}\right)} \quad \Theta_{cap} = \frac{0.5}{\left(\frac{1}{\Theta_m}\right) + \left(\frac{1}{\Theta_d}\right) + \left(\frac{1}{\Theta_{ms} \Theta_{dl}}\right)}$$

$A_m = wh \quad A_{cap} = WH \quad A_d = WH - whN$

注： Θ_{cap} 的作用，即晶体管中 Θ_{jc} 的作用

图6:



这里 P_d = 电容内耗散的功率 (瓦)
 T_A = 环境温度 (°C)
 ∇ = 无限大散热器 (无论输入多少热量，其温度都不改变)

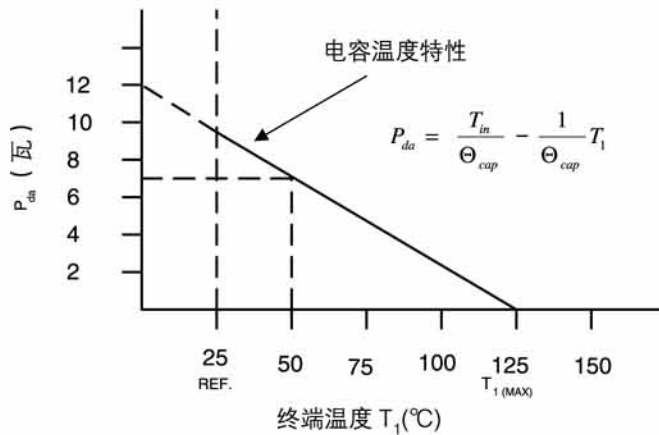
AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

ATC North America 631-622-4700 • sales@atceramics.com ATC Europe +46 8 6800410 • sales@atceramics-europe.com ATC Asia +86-755-8366-4318 • sales@atceramics-asia.com

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

图7



这里，在 $T_A = T_1 = 25^\circ\text{C}$ 时； $P_{d\max} = \left(\frac{1}{\Theta_{\text{cap}}}\right) T_{\text{in}}$

在 $P_d = 0$ 时； $T_{1\max} = 125^\circ\text{C}$

$$\text{斜率} = \frac{\Delta P_d}{\Delta T_1} = \frac{-1}{\Theta_{\text{cap}}}$$

P_{da} 是电容内温度为 $T_{1\max}$ 时容许的耗散功率。

例如，把散热器温度定在 50°C ，那么终端温度也就是 50°C 。这时对于 7.2 瓦的 P_{da} ，电容内部温度就是 125°C 。图7用虚线标出了这个情况。用类似方法可以确定任何散热器温度（即电容终端温度）下电容的额定功率。需要强调的是，使用等效线路和根据它画出的曲线的前提是电容的两个终端要与同一个无限大散热器连接。实际电容的 P_{da} 值在功率和温度额定值曲线1和2上画出。

曲线6提供100A和100B系列容值在 1.0pF 和 1000pF 之间电容的功率耗散和热阻。

表1中电容，如果两个终端都接在无限大散热器上，散热器温度

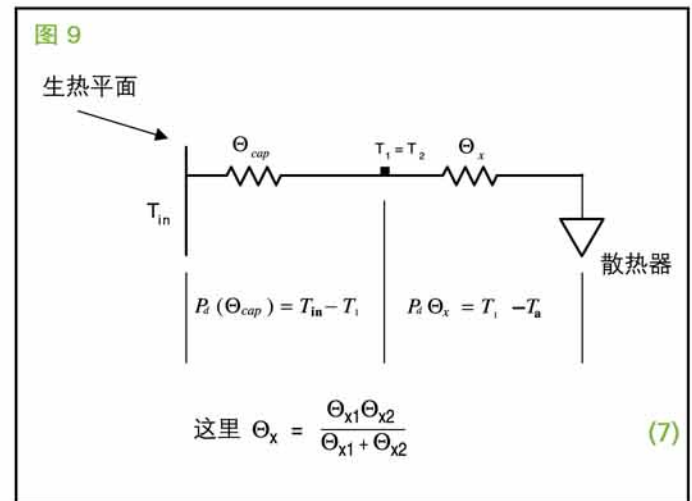
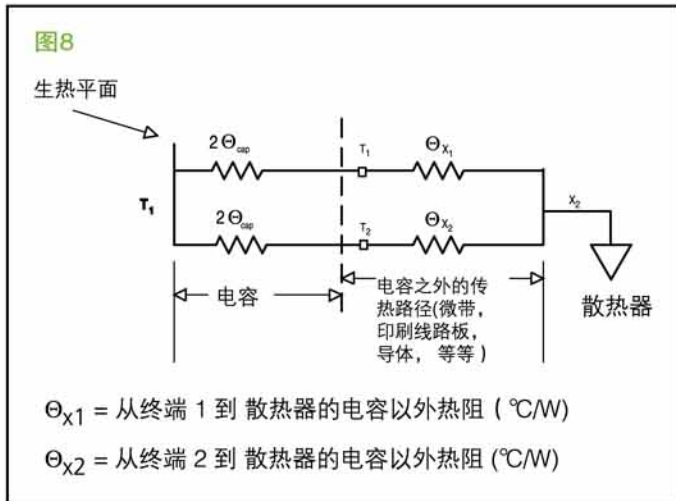
为 25°C 时，允许的功率耗散列在表2内。

图8的线路考虑了电容本身热阻和电容以外热阻。假设 $T_1 = T_2$ ，传热线路就变成了图9。

图9线路可以用以下方程表示：

$$P_d \Theta_{\text{cap}} + P_d \Theta_x = T_{\text{in}} - T_A \quad (8)$$

因为 T_{in} 取最大值，也就是 125°C ， Θ_{cap} 和 Θ_x 已知，线路设计者可以用代数方式或图解方式解这个方程，求得最大允许耗散功率。



AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

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

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

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

表2

无限大散热器温度定为 25°C, 连接电容的两个终端

系列	100A		100B		
容值 (pF)	1	100	1	100	1000
Θ_{cap} (°C/瓦)	13.7	11.4	7.9	7.2	5.9
25°C时最大功率耗散 (瓦)	7.3	8.8	12.6	13.9	16.9

如用图解法，在图7中加以下方程代表的一条线：

$$P_d = \frac{1}{\Theta_x} (T_1 - T_A) \quad (9)$$

见图10。

在 T_1 轴上 $T_1 = T_A$ 的点开始，画一条斜率为 $1/\Theta_x$ 的直线。这条直线和代表电容温度特性的直线的交点坐标给出这个传热线路的允许功率耗散和电容终端温度。这时电容内温度(T_{in})为125°C。

确定额定电流

如果知道外部传热线路确定以后电容中允许的功率耗散(P_{da})，和工作频率下等效串联电阻ESR，功率耗散限定的电流可以按下式计算：

$$I_{DL} = \sqrt{\frac{P_{da}}{ESR}} \quad (10)$$

12页上ATC特性曲线给出了等效串联电阻ESR的数值。

只要不超过电容的最大额定电压，以上 I_{DL} 就有效。由最大额定电压决定的电压限定电流可以按方程(11)计算。

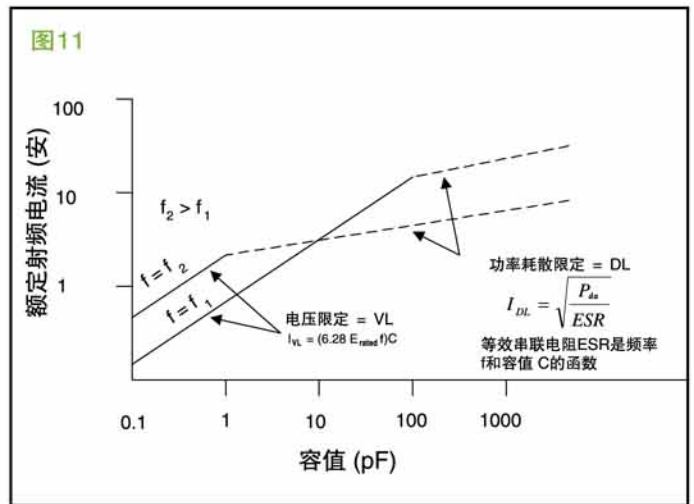
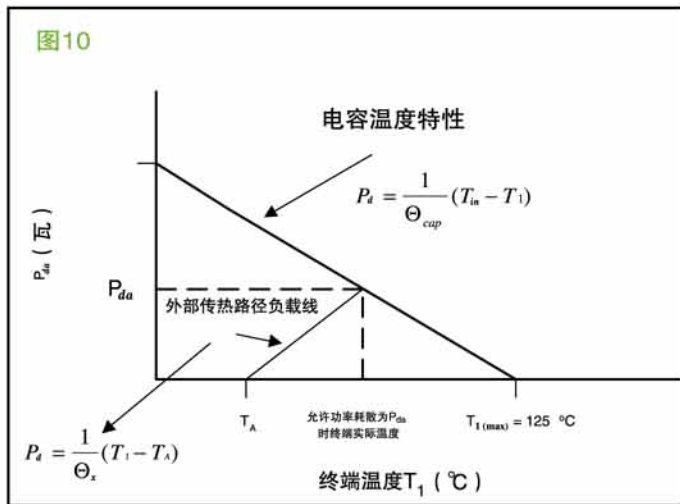
$$I_{VL} = \frac{E_{rated}}{X_C} = E_{rated} (2\pi f C) \quad (11)$$

由方程(10)和(11)可以作一族最大允许电流对容值的曲线，见图11。从图11可以看出，当电压限定电流比耗散限定电流小的时候，电压限定电流就是额定电流。参见曲线3、4和5中的100A和100B系列电容的电流对容值曲线。

结论

上面讲解了确定多层陶瓷电容额定射频电流的有关知识和方法，也介绍了怎样得到额定电流曲线。

此外，还推导了各种电容参数（例如等效串联电阻，射频额定电压和热阻）对额定电流的影响的表达式。以上数据资料是先经理论推导出来，然后由试验验证的。本文也使用了这些数据资料来分析具体传热条件的例子来计算额定电流。



AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

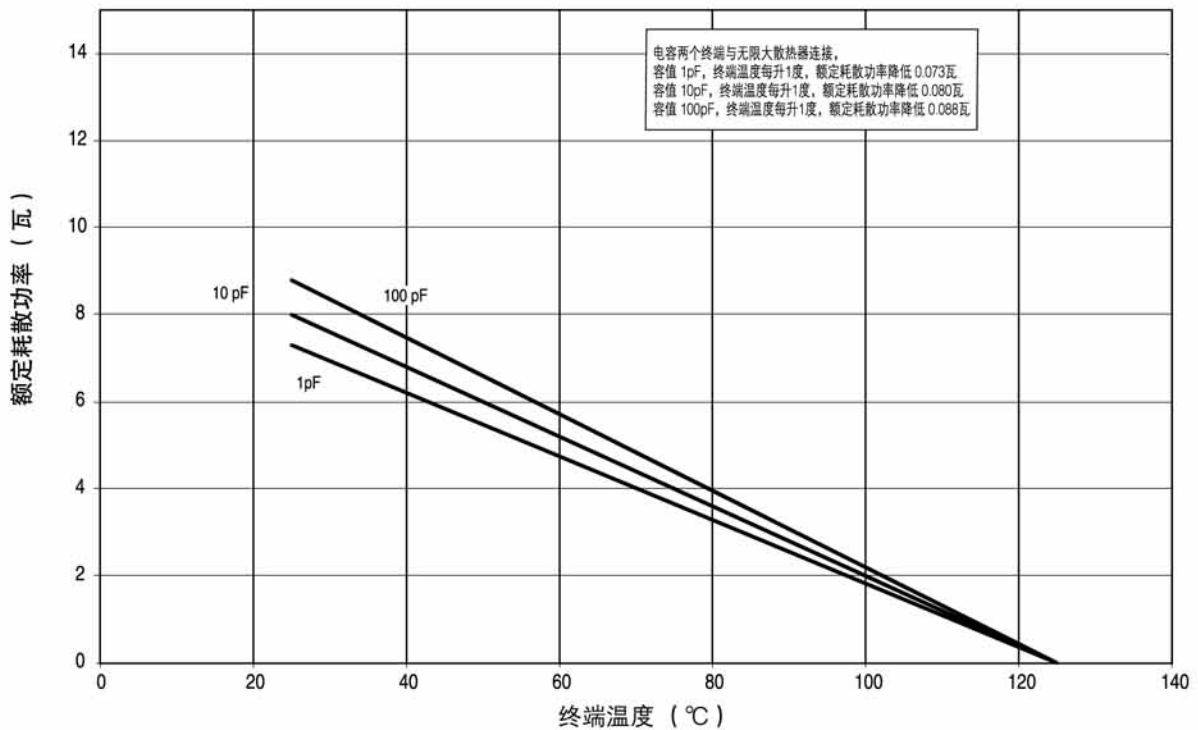
ATC Europe
+46 8 6800410 • sales@atceramics-europe.com

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

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

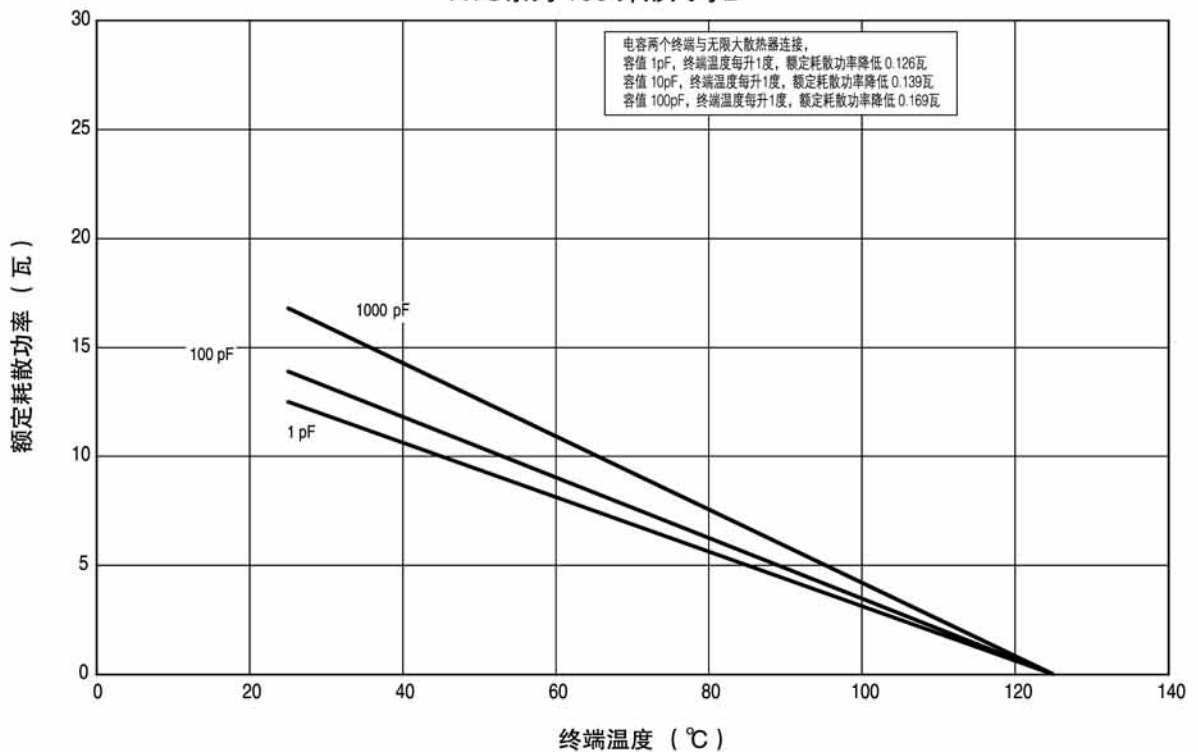
曲线1

额定功率对温度
ATC系列 100 外形尺寸A



曲线2

额定功率对温度
ATC系列 100 外形尺寸B



AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

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

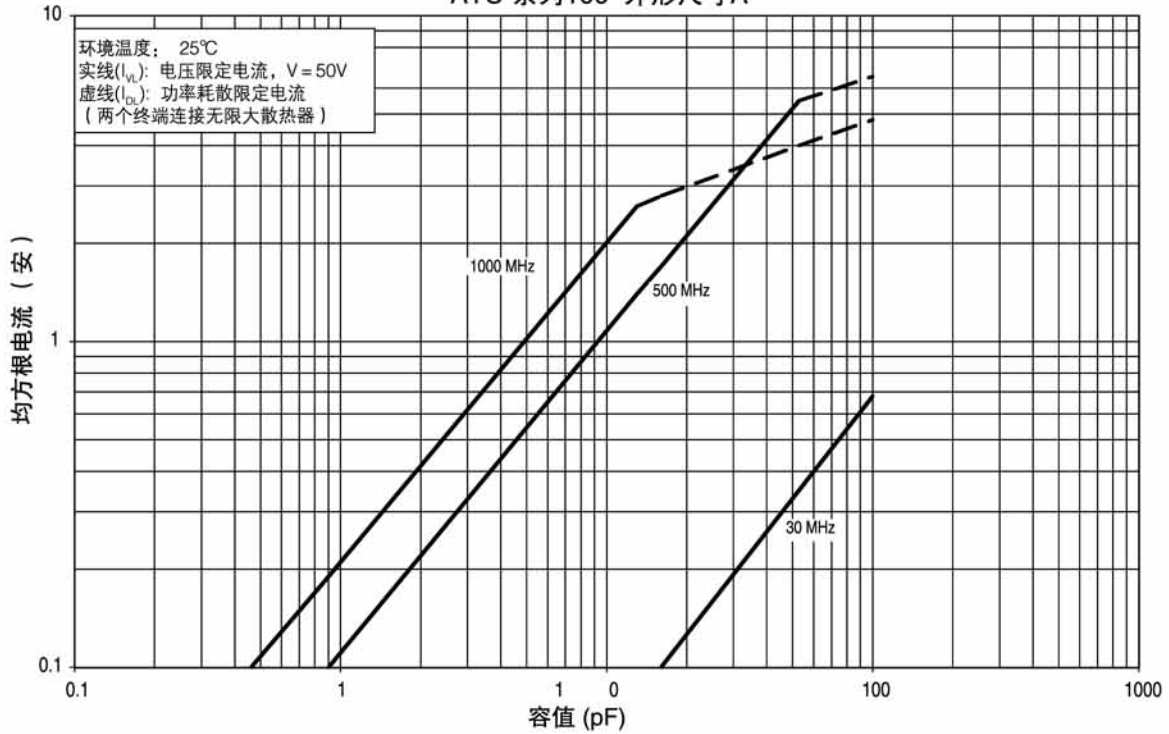
ATC Asia
+86-755-8366-4318 • sales@atceramics-asia.com

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

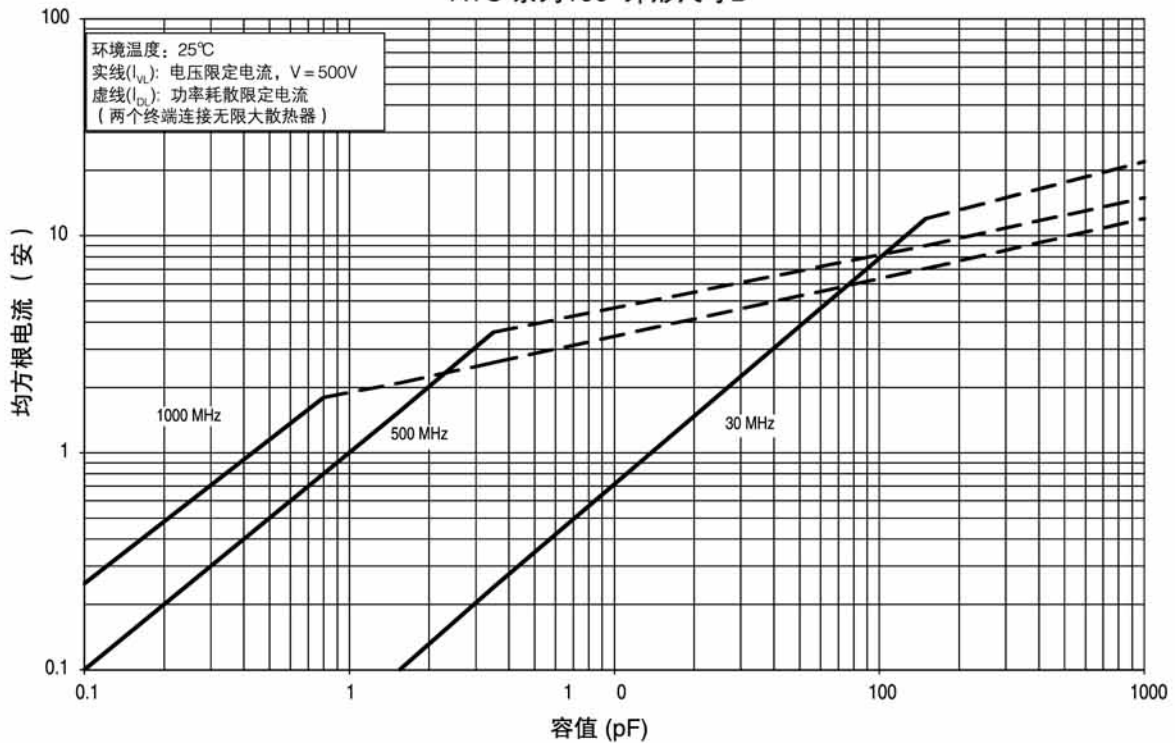
曲线3

额定电流对容值
ATC 系列100 外形尺寸A



曲线4

额定电流对容值
ATC 系列100 外形尺寸B



AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

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

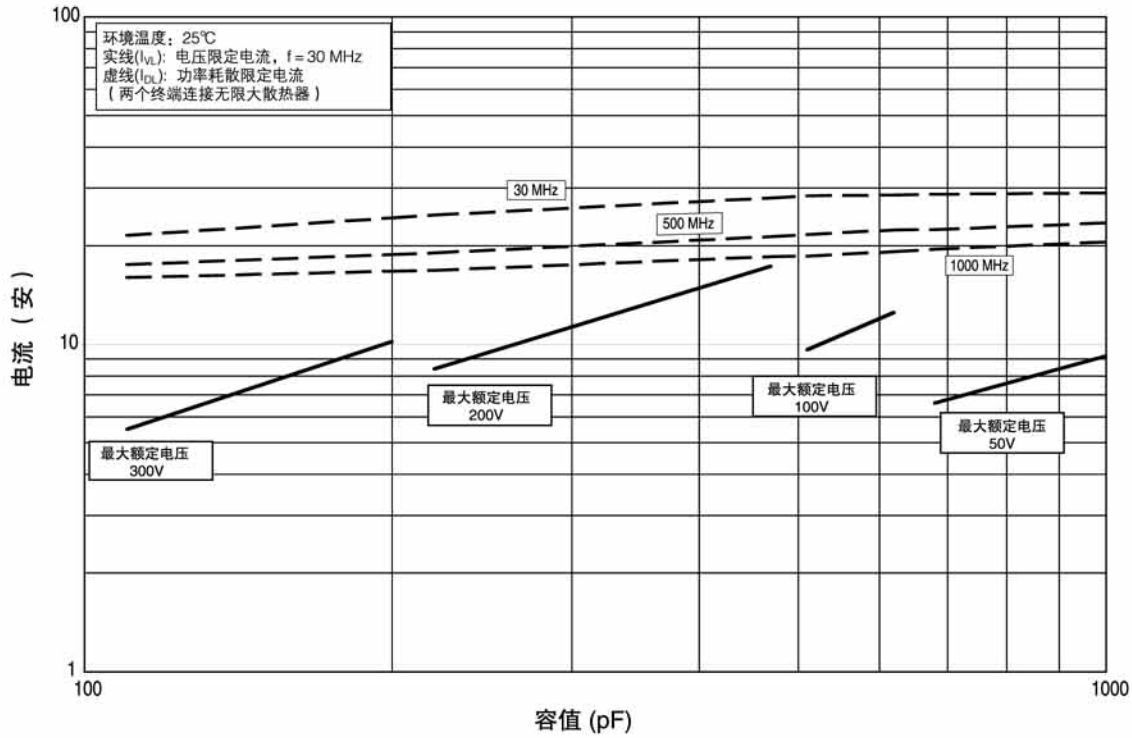
ATC Asia
+86-755-8366-4318 • sales@atceramics-asia.com

www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

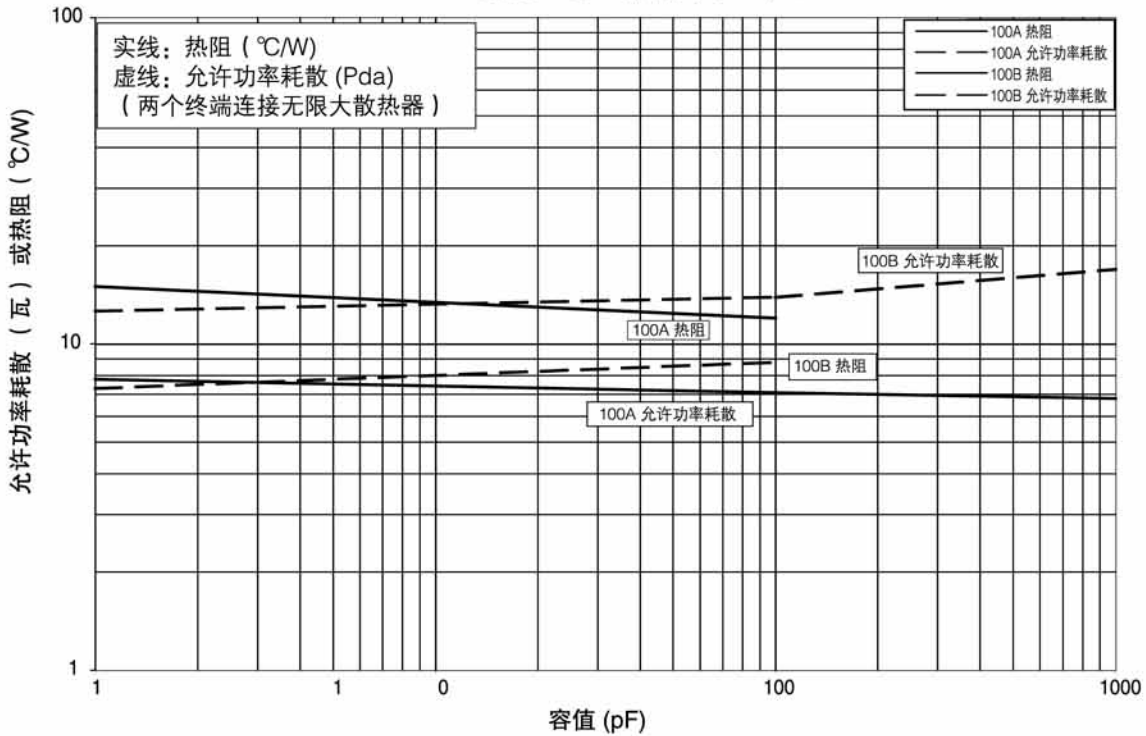
曲线5

额定电流
ATC 系列100 外形尺寸B



曲线6

功率耗散和热阻
ATC系列 100 外形尺寸 A 和 B



AMERICAN TECHNICAL CERAMICS

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

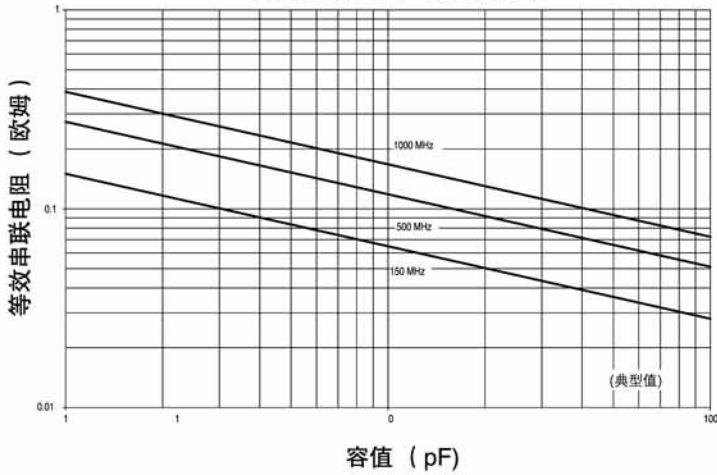
ATC Europe
+46 8 6800410 • sales@atceramics-europe.com

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

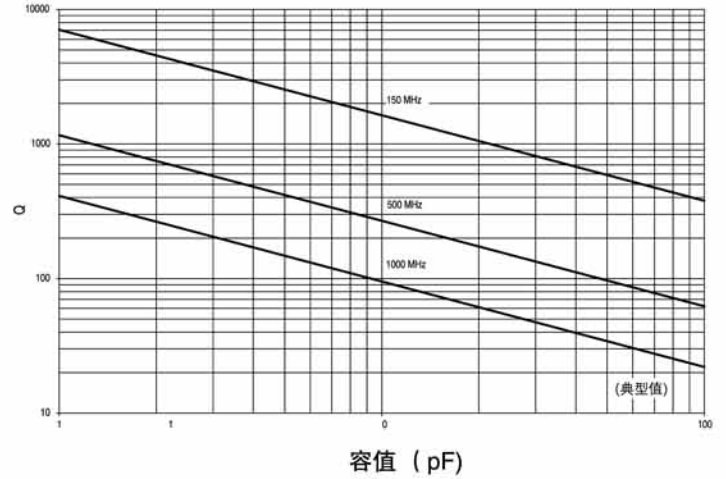
www.atceramics.com

如何确定陶瓷多层电容的热阻，功率耗散和额定电流

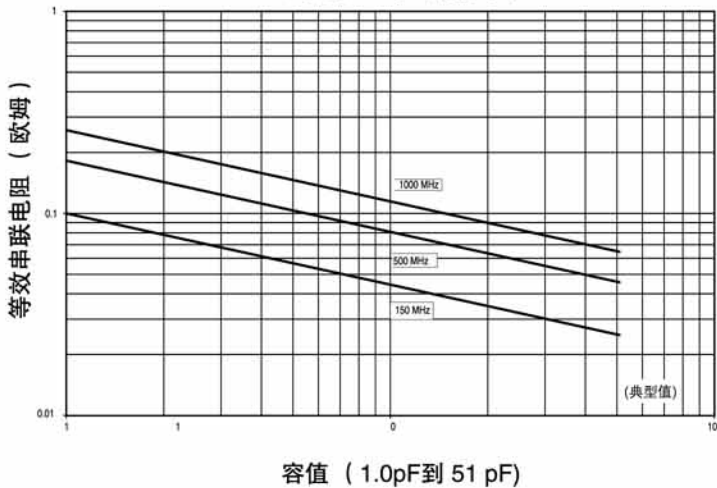
曲线 7 等效串联电阻对容值
ATC系列 100, 外形尺寸 A



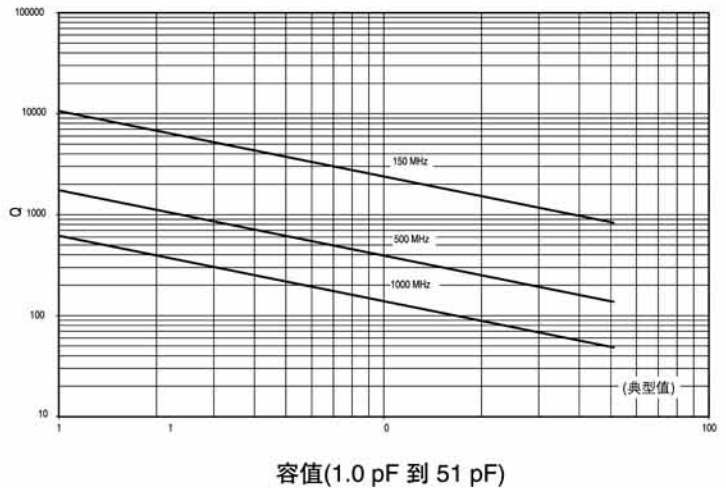
曲线 8 Q对容值
ATC系列 100, 外形尺寸A



曲线9 等效串联电阻对容值
ATC系列 100, 外形尺寸 B



曲线 10 Q对容值
ATC系列 100, 外形尺寸 B



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。

© 1985 ATC保留所有权

ATC # 001-867 Rev. D; 9/05

A M E R I C A N T E C H N I C A L C E R A M I C S

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

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

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