
微波射频器件极限功率损耗与分散详解

每个器件都有一个最大的功率极限，不管是有源器件（如放大器），还是无源器件（如电缆或滤波器）。理解功率在这些器件中如何流动有助于在设计电路与系统时处理更高的功率电平。

它能处理多大的功率这是对发射机中的大多数器件不可避免要问的一个问题，而且通常问的是无源器件，比如滤波器、耦合器和天线。但随着微波真空管（如行波管（TWT））和核心有源器件（如硅横向扩散金属氧化物半导体（LDMOS）晶体管和氮化镓（GaN）场效应晶体管（FET））的功率电平的日益增加，当安装在精心设计的放大器电路中时，它们也将受到连接器等器件甚至印刷电路板（PCB）材料的功率处理能力的限制。了解组成大功率器件或系统的不同部件的限制有助于回答这个长久以来的问题。

发射机要求功率在限制范围内。一般来说，这些限制范围由政府机构规定，例如美国联邦通信委员会（FCC）制定的通信标准。但在“不受管制”系统中，比如雷达和电子战（EW）平台中，限制主要来自于系统中的电子器件。每个器件都有一个最大的功率极限，不管是有源器件（如放大器），还是无源器件（如电缆或滤波器）。理解功率在这些器件中如何流动有助于在设计电路与系统时处理更高的功率电平。

当电流流过电路时，部分电能将被转换成热能。处理足够大电流的电路将发热——特别是在电阻高的地方，如分立电阻。对电路或系统设定功率极限的基本思路是利用低工作温度防止任何可能损坏电路或系统中器件或材料的温升，例如印刷电路板中使用的介电材料。电流/热量流经电路时发生中断（例如松散的或虚焊连接器），也可能导致热量的不连续性或热点，进而引起损坏或可靠性问题。温度效应，包括不同材料间热膨胀系数（CTE）的不同，也可能导致高频电路和系统中发生可靠性问题。

热量总是从更高温度的区域流向较低温度的区域，这个原则可以用来将大功率电路产生的热量传离发热源，如晶体管或 TWT。当然，从热源开始的散热路径应该包括由能够疏通或耗散热量的材料组成的目的地，比如金属接地层或散热器。不管怎样，任何电路或系统的热管理只有在设计周期一开始就考虑才能最佳地实现。

一般用热导率来比较用于管理射频/微波电路热量的材料性能，这个指标用每米材料每一度（以开尔文为单位）施加的功率（W/mK）来衡量。也许对任何高频电路来说这些材料最重要的一个因素是 PCB 叠层，这些叠层一般具有较低的热导率。比如低成本高频电路中经常使用的 FR4 叠层材料，它们的典型热导率只有 0.25W/mK。

相反，铜（沉积在 FR4 上，作为地高平面或电路走线）具有 355W/mK 的热导率。铜具有很大的热流动容量，而 FR4 具有几乎可以忽略的热导率。为防止在铜传输线上产生热点，必须为从传输线到地平面、散热器或其它一些高热导率区域

提供高热导率路径。更薄的 PCB 材料允许到地平面的路径更短，因为可以使用电镀过孔（PTH）从电路走线连接到地平面。

当然，PCB 的功率处理能力是许多因素的函数，包括导体宽度、地平面间距和材料的耗散因数（损耗）。此外，材料的介电常数将确定在给理想特征阻抗下的电路尺寸，比如 $50\ \Omega$ ，因此具有更高介电常数值材料允许电路设计师减小其射频/微波电路的尺寸。也就是说，这些更短的金属走线意味着需要具有更高热导率的 PCB 介电材料来实现正确的热管理。

在给定的应用功率电平下，具有更高热导率的电路材料的温升要比更低热导率材料低。遗憾的是，FR4 与许多具有低热导率的其它 PCB 材料没有什么不同。不过，电路的热处理能力和功率处理能力可以通过规定采用至少与 FR4 相比具有更高热导率的 PCB 材料加以改进。

例如，虽然还没到铜的热导率水平，但 Rogers 公司的几种 PCB 材料可以提供比 FR4 高得多的热导率。R04350B 材料的热导率是 0.62W/mK ，而该公司的 R04360 叠层热导率可达 0.80W/mK 。虽然没有显著的提高，但与 FR4 叠层相比确实有了两至三倍的热/功率能力提升，可实现射频/微波电路所产生热量的有效耗散。这两种材料特别适合具有内置热源（晶体管）的放大器应用，它们都具有较低的热膨胀系数（CTE）值，因此能最大限度地减少随温度发生的尺寸变化。

许多商用计算机辅助工程（CAE）软件设计包能够在给定的应用功率电平和给定的电路参数设置条件下建模经过射频/微波电路的热量流动，包括 PCB 的热导率。这些软件设计包包含有许多单独的程序，比如 SonnetSoftware 公司的电磁仿真（EM）工具、Fluent 公司的 IcePak 软件、ANSYS 公司的 TASPcB 软件以及 Flomerics 公司的 Flotherm 软件。它们还包含许多设计软件工具套件，如安捷伦科技（Agilent）的高级设计系统（ADS）、ComputerSimulationTechnology 公司（CST）的 CSTMicrowaveStudio 以及 AWR 公司的 MicrowaveOffice。

这些软件工具甚至可以用来研究不同工作环境对射频/微波电路功率处理能力的影响，比如在飞机的低大气压力或高海拔环境下足够高功率电平下可能出现的电弧。这些程序还能通过对能量流经器件（如耦合器或滤波器）时的场分布情况建模，来提升分立射频/微波器件的功率处理能力。

当然，PCB 材料并不是影响射频/微波电路或系统中热量流动的唯一因素。电缆和连接器对高频系统中功率/热量的限制也是众所周知的。在同轴组件中，连接器通常可以比它所连接的电缆处理更多的热量/功率，而不同连接器具有不同的功率额定值。例如，N 型连接器的功率额定值稍高于具有更小尺寸（和更高频率范围）的 SMA 连接器。电缆和连接器的平均功率和峰值功率都有额定值，峰值功率等于 V^2/Z ，其中 Z 是特征阻抗， V 是峰值电压。平均功率额定值的简单估算方法是将电缆组件的峰值功率额定值乘以占空比。

Astrolab 公司等许多电缆供应商开发了专门的计算程序来计算他们的同轴电缆组件的功率处理能力。而 TimesMicrowaveSystems 等一些公司则提供免费的

可下载计算程序,这些程序可用于预测他们自己的不同类型同轴电缆的功率处理能力。

值得注意的是,这是对复杂主题的极其简单化处理。它还没有涉及材料击穿电压、PCB 耗散因数(损耗因数)如何影响电路的功率处理能力、对 PCB 材料热膨胀系数(CTE)性能的影响以及连续波和脉冲能源之间发热效应区别等主题。

在器件、电路和系统内,还有许多复杂的现象可能影响到功率处理能力,包括具有“打开”和“关闭”状态的开关等可能具有不同射频/微波功率能力的器件。除了软件程序外,可用于热分析的工具还可以提供基于红外(IR)技术的热成像功能,可以用来安全地研究器件、电路和系统中的热量累积。

OFweek 电子工程网