

使用半导体二极管的动态热阻曲线估算虚温

 Reza Behtash博士，产品质量高级主管

在开关模式电源等许多应用中，半导体器件以脉冲模式运行，而不是连续波。这类应用中的半导体器件可能永远无法达到稳定的工作点。因此，使用稳态热阻对其热行为建模是没有意义的，因为这样产生的结果并不准确。本白皮书将讨论使用动态热阻曲线对器件行为建模的替代方法，并展示在实际二极管上使用SPICE仿真的成功应用。

动态热阻动态热阻

动态热阻动态热阻(Z_{th})是用于描述热量如何随时间传导的量化指标，包括瞬态过程中的热阻和热容。如果用电学类比来解释，这些热容必须先“充电”，然后热量才能扩散（如图1所示的作为热系统的SMD封装二极管）。动态热阻量化两个参考点A和B之间的温差引起的瞬态热流。 Z_{th} 也与所施加的信号脉冲存在函数关系：

$$Z_{th(A-B)}(t_{pulse}) = \frac{\partial T}{\partial P} \Big|_{t = t_{pulse}}$$

Z_{th} 值在二极管数据手册中通常指定为曲线。它们可用于计算二极管作为热系统时在脉冲条件下的发热量。然而，计算时还必须考虑信号的脉冲宽度和占空比。

Foster和Cauer建模

分立半导体器件的动态热行为可以使用名为Foster和Cauer模型的RC热网络进行仿真。这些RC模型源自热量曲线，该曲线描述了Nexperia的PMEG050T150EIPD肖特基二极管等器件的动态热阻（图2），并表示器件响应瞬态功率脉冲的热行为。 Z_{th} 是通过在应用不同时间段的阶跃函数时测量功率损耗来生成的。

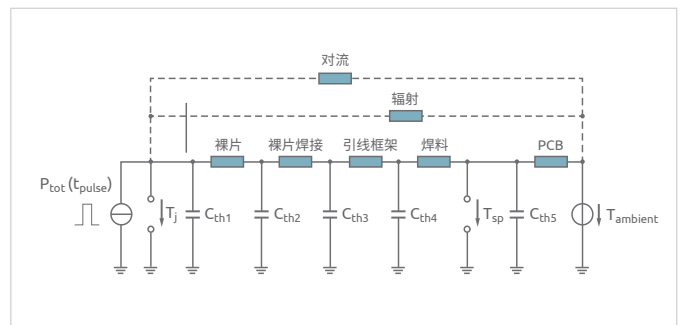


图1 作为热系统的SMD封装二极管。

从图2中可以看出，器件持续承受功率脉冲超过200秒后达到热平衡（稳态）。此时， Z_{th} 达到稳定状态并与 R_{th} 具有相同的值。该图还体现了热惯性，即材料的温度不会骤变。这一特性意味着器件可以在短时间内负荷更高的功率水平。图2还显示了具有不同占空比的重复脉冲的 Z_{th} 曲线。它们还代表由于RMS功耗而导致的额外温升。

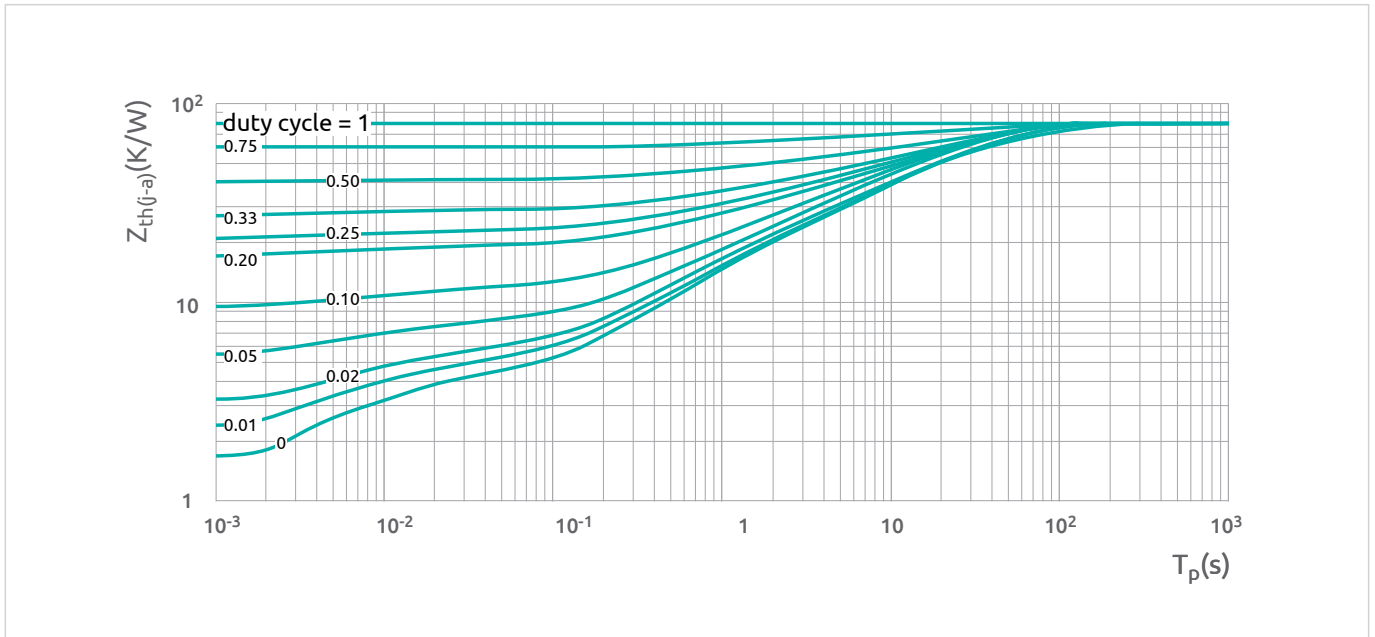


图2 PMEG050T150EIPD从结到环境的瞬态热阻抗与脉冲和占空比的函数关系

如何计算结温升

要计算具有单个活动区域（结处的热源）的半导体器件结内的温升，必须知道传递到器件的信号脉冲的功率和持续时间。动态热阻可以直接从方波功率脉冲的 Z_{th} 图表中读取。结温升是该值与信号功率的乘积。当对器件施加恒定功率时，可以使用稳态热阻抗 R_{th} ，温升仍然是信号功率和 R_{th} 的乘积。对于瞬态脉冲（正弦或脉冲），计算器件结内的温升更为复杂。计算持续时间为 τ 的事件后结温(T_j)增加的正确数学方法是应用卷积积分，其中功率脉冲和 Z_{th} 曲线均表示为时间的函数，以产生温度曲线：

$$\Delta T_j = \int_0^\tau P(t) \frac{dZ_{th}(\tau-t)}{dt} dt$$

然而，由于数学上并没有定义 $Z_{th}(\tau-t)$ ，所以这种算法并不简单。或者，可以使用叠加将波形近似为一系列矩形脉冲。然而，这种方法虽然简单，但也有缺点。波形越来越复杂，就需要不同的叠加来准确地对波形建模。另一种方法是将 Z_{th} 表示为RC热模型，从而允许使用SPICE仿真器计算结温。

热参数和电参数之间的等效性

根据表1，器件的热阻和热容值可以分别类比为等效电阻和电容。此外，将电流类比为功率，将电压类比为温差，任何热网络都可以类比为电气网络。

类型	阻值	势	能量	能量
电性能 ($R=V/I$)	R =欧姆电阻 (欧姆)	V =电势(伏特)	I =电流(安培)	C =电容(法拉)
热性能 ($R_{th}=K/W$)	R_{th} =热阻 (K/W)	K =温差(开尔文)	W =功耗(瓦)	C_{th} =热容 (热质量)

表1 半导体器件的电学和热学类比

Foster模型是通过通过对 Z_{th} 的半经验曲线拟合推导出的，其结果是一个图3所示的一维RC网络。然而， R 值和 C 值在物理器件上并无对应的几何位置。因此，与其他建模方法不同，这些值不能根据器件材料常数来计算。Foster RC模型的一个局限性是无法将其分割或连接到另一个组件（如散热片）的模型。

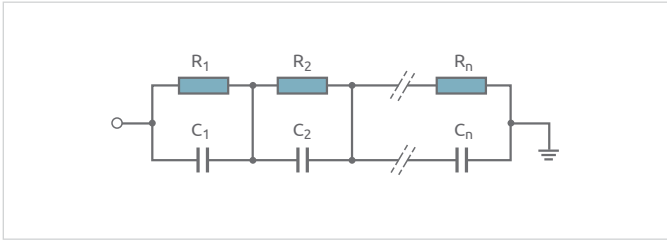


图3 Foster RC热模型

Foster RC模型简化了热阻 Z_{th} 的表示。例如，通过测量器件的发热（或冷却）曲线并生成 Z_{th} 曲线，可以使用以下等式创建“拟合”曲线，如图4所示。

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \text{ where } \tau_i = R_i \times C_i$$

热阻 R_i 和热容 C_i 用于创建之前图3中所示的热网络模型。通过应用最小二乘曲线拟合算法，可以优化解析表达式中的参数，直到时间响应与瞬态系统响应相匹配。Foster模型没有物理意义，因为现实中不存在节点到节点的热容。但是，可以通过数学转换将Foster模型转换为与之对应的Cauer模型。可以从器件

的n级Foster模型推导出n级Cauer模型，以产生其热性能的等效表示。与Foster模型类似，Cauer模型（图5）也包含RC网络，但所有热容均连接到热接地（环境温度）。与Foster模型不同的是，Cauer模型中的节点具有物理意义，允许计算半导体结构中内层的温度。

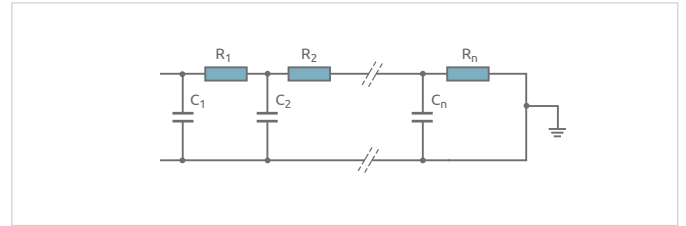


图5 Cauer RC热模型

Nexperia为其许多器件提供了Foster和Cauer RC模型，帮助应用工程师快速计算复杂功率曲线封装的瞬态热响应。虽然Foster和Cauer模型对器件热行为的表示是相同的，但Cauer模型更能代表器件的物理结构，因此以下部分将使用Cauer模型。表2所示的Cauer网络网表可用于创建SPICE原理图（图6）。

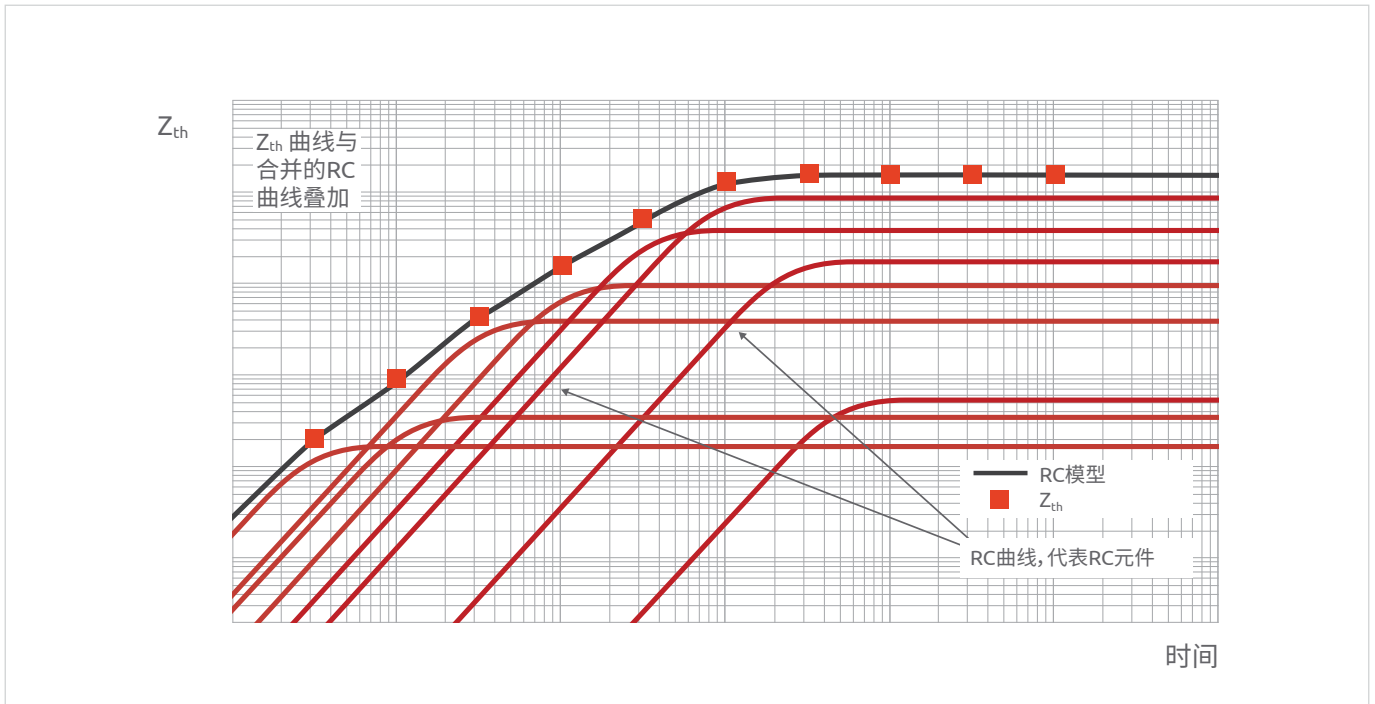


图4 Foster RC热模型。各个 R_i 和 C_i 组合相加即形成 Z_{th} 曲线。

```

*****
* 器件:PMEG050T150EIPD
* Rth(-sp)的Cauer热RC网络模型
*****
.subckt cauer 1 6 7
R1      1      2      0.113734
R2      2      3      0.0998565
R3      3      4      0.229452
R4      4      5      0.346807
R5      5      6      0.0136469
C1      1      7      0.00317279
C2      2      7      0.00317279
C3      3      7      0.00491032
C4      4      7      0.00614301
C5      5      7      0.0274844
.end cauer

```

表2 Nexperia的PMEG050T150EIPD二极管的Cauer模型网表

网表中的引脚1是原理图中的结温引脚 T_j 。同样，引脚6和7代表环境温度引脚(T_{amb})。只有器件的引脚6和7连接到环境电压源，用于仿真该热网络。使用Cauer模型的另一个优点是它们允许连接外部网络，从而能够分析PCB发热和散热器的额外影响。为此，引脚7必须连接到环境温度，引脚6必须连接到外部Cauer网络的第一个引脚。为了获得正确的结果，外部Cauer网络的端接引脚必须连接到环境源。

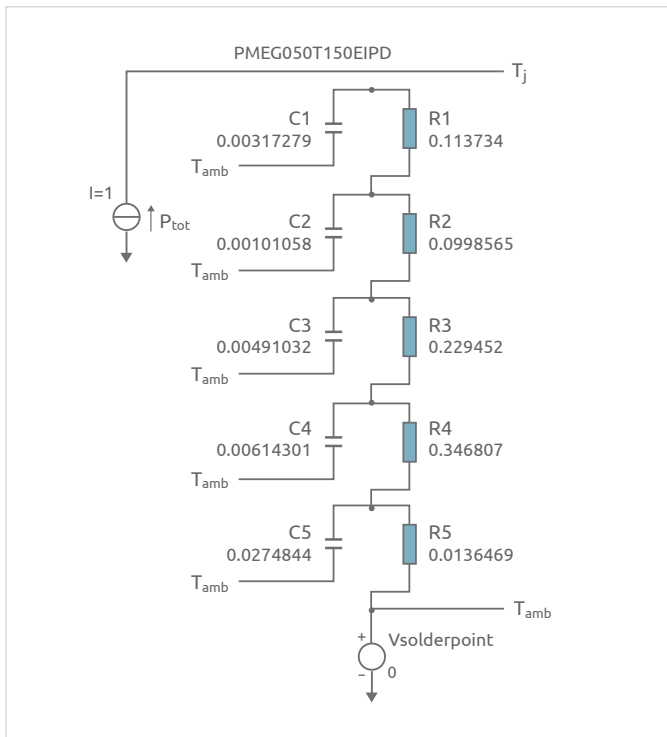


图6 根据表2中的Cauer模型网表生成的原理图

热性能仿真示例

RC热模型是根据器件的 Z_{th} 热量曲线生成的。以下示例演示了使用RC模型通过SPICE仿真器绘制Nexperia PMEG050T150EIPD二极管的 Z_{th} 曲线，以便更轻松地从数据手册曲线中读取 Z_{th} 值。 T_{sp} 表示焊点温度并被视为等温，在本例中设置为0。1W单次脉冲在二极管中耗散。对于单次脉冲，脉冲之间的持续时间为无穷大，因此占空比 $\delta=0$ 。由此，结温 T_j 也代表瞬态热阻抗 Z_{th} 。下面的公式表明，当 $P=1W$ 时， Z_{th} 的大小等于 ΔT 。

$$T_j = T_{sp} + \Delta T = 0^\circ C + \Delta T = \Delta T$$

$$\Delta T = P \cdot Z_{th} = 1W \cdot Z_{th}$$

设置热性能SPICE仿真

按照以下步骤准备和执行热网络的SPICE仿真：

- 1 在SPICE中建立PMEG050T150EIPD的RC热模型
- 2 设置电压源的值 $V_{solderpoint} = 0$ ，即 T_{sp} 的值
- 3 设置电流源的值 $P_{tot} = 1$
- 4 创建仿真曲线并将运行时间设置为100 ms
- 5 运行仿真
- 6 绘制节点 T_j 处的电压

图7中的仿真结果显示了结温 (T_j 下的电压)，它也是PMEG050T150EIPD的热阻。

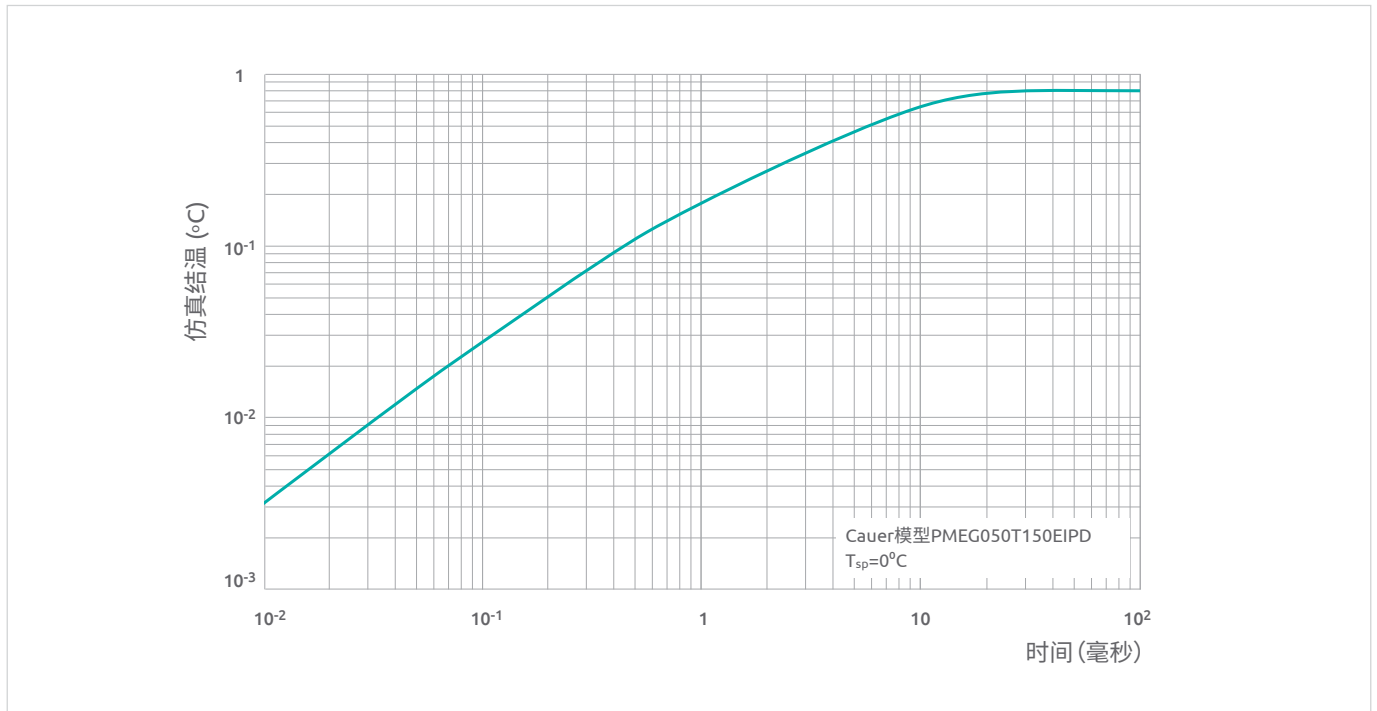


图7 对PMEG050T150EIPD施加1W功率时的仿真结温与时间的关系。焊点温度设置为0°C。

从该图中，可以使用SPICE波形显示中的光标读取不同时间的 Z_{th} 值。本例中电流源的值设置为1A，表示二极管中消耗的功率为1W。该值可以针对任何功率曲线轻松修改。还可以更改仿真持续时间以表示一定范围的方波功率脉冲。SPICE仿真还可以用于研究内部器件结的温度。

结论

动态热阻(Z_{th})描述热量如何随时间传导，包括瞬态过程中的热阻和热容。由于在脉冲应用中使用稳态模型来分析器件的热行为产生的结果不准确，因此可以使用 Z_{th} 曲线。本白皮书讨论了该方法背后的理论，并通过成功仿真二极管的热行为展示了其应用效果。

关于Nexperia

Nexperia总部位于荷兰，是一家在欧洲拥有丰富悠久发展历史的全球性半导体公司，目前在欧洲、亚洲和美国共有15,000多名员工。作为基础半导体器件开发和生产的领跑者，Nexperia的器件被广泛应用于汽车、工业、移动和消费等多个应用领域，几乎为世界上所有电子设计的基本功能提供支持。Nexperia为全球客户提供服务，每年的产品出货量超过1,000亿件。这些产品在效率（如工艺、尺寸、功率及性能）方面成为行业基准，获得广泛认可。Nexperia拥有丰富的IP产品组合和持续扩充的产品范围，并获得了IATF 16949、ISO 9001、ISO 14001和ISO 45001标准认证，充分体现了公司对于创新、高效、可持续发展和满足行业严苛要求的坚定承诺。

在[此处](#)查找您的地区销售办事处

© 2023 Nexperia B.V.

保留所有权利。未经版权所有者事先书面同意，禁止复制本文全部或部分內容。本文档中所提供的信息不构成任何报价或合同的一部分，且被认为是准确可靠的，如有变更，恕不另行通知。对于使用本文档所产生的任何后果，出版方概不承担任何责任。出版內容既不传达也不暗示专利或者其他工业或知识产权下的任何许可。

发布日期:

2023年7月