

SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens PLM Software

全电路 3D 电热建模

通过测量和校准实现更高精确度

高层摘要

通常而言，典型的电子系统 3D 热仿真假设所有功率以规定的功率值耗散在半导体中。对于强电流电源模块，配电网中的功率损耗已经成为重要因素。对于市售元件而言，铜引线中的功率损耗可以达到总输入功率的 30%。这一趋势使得仿真中必须考虑热效应，因为如果只考虑半导体作为唯一热源，对于强电流和未来应用而言可能并非准确方法。

罗宾·博尔诺夫、安德拉斯·瓦斯-瓦尔奈、拜伦·布莱克莫尔、王刚、黄文宏

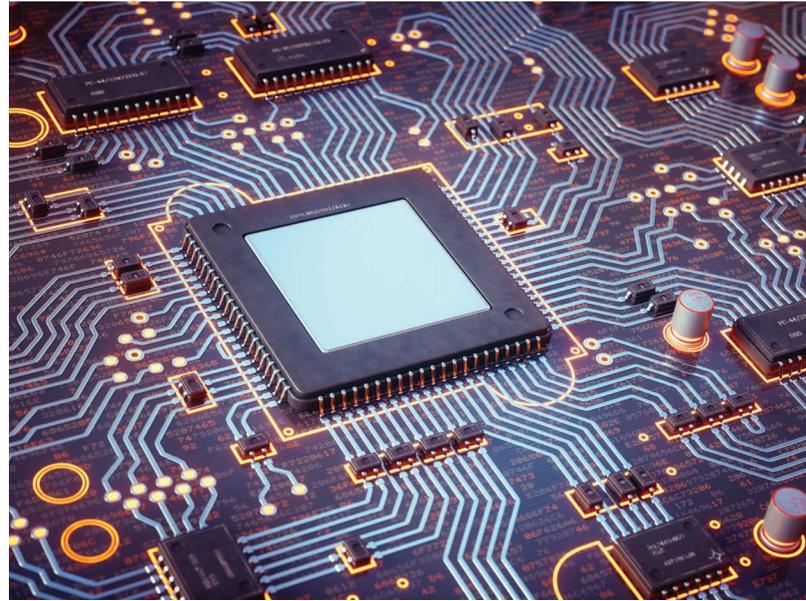
目录

| | |
|----------------------------|----|
| 摘要..... | 3 |
| 功率损耗影响热仿真 | 4 |
| 评估电热仿真方法..... | 5 |
| 实际测量绝缘栅双极晶体管..... | 6 |
| 调节和校准模型 | 7 |
| 我们所了解的功率损耗..... | 9 |
| 有源层功率损耗效应 | 10 |
| 比较芯片中的假设总功率损耗 | 11 |
| 使用线性电气模型的局限 | 12 |
| 克服对开关过程中总功率损耗进行建模的局限 | 13 |
| 结论..... | 14 |

摘要

功率损耗值、假设功率只在半导体中损耗，这些都会在温升预测中引发重大错误。这些错误可以通过电热仿真方法克服，此方法对全电路进行模拟，预测供电网络中的电阻加热以及半导体中的损耗。求解系统的电热特性，可以预测功率级别和配电，从而提高温升预测的准确性。

本文使用绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 逆变器作为示例，对此方法进行阐释。由此生成的全电路电热仿真可以预测整个逆变器模块中的功率损耗和温度变化。



功率损耗影响热仿真

温升预测的准确性由幅值和配电方面的功率损耗准确性决定。人们普遍以为功率只会在半导体芯片的有源层损耗。但是对于强电流电子应用，相当大量的功率是在电源系统的其余部分损耗的。随着降低漏源通态电阻 ($R_{ds(on)}$) 趋势的不断增强，电源系统的相对电阻以及最终的功率损耗，将会日益显著。仿真如何适应这种趋势呢？

评估电热仿真方法

绝缘栅双极晶体管是一种三端半导体器件，主要用作电子开关，融合了高效和快速开关的特点。配有绝缘栅双极晶体管的电路可以通过 SPICE 和 Saber 之类不同电路仿真计算机程序创建和建模。要模拟绝缘栅双极晶体管电路，该器件（以及电路中的其他器件）必须具有能够预测或模拟器件对于不同电线端电压和电流响应的模型。对于更精确的仿真，温度对于绝缘栅双极晶体管不同部分的影响，也应包括在其中。

通过求解系统的电热特性，可以预测功率，或许包括温度对功率的依赖性。这通常是使用两种标准方法中的一种实现的。松弛法将两种独立的电热求解器结合起来，在两者之间传递温度和功率。直接法在一种求解器中求解电热两方面特性。使用直接法的电热仿真电路模拟器类型网络求解器越来越普遍。

为此，我们专门研究了直接法在全电路 3D 电热仿真情况下的工作方式。研究目标是确认仿真模型在预测功率损耗分配以及相应温升变动方面的准确性。

实际测量绝缘栅双极晶体管

我们首先通过 Simcenter T3STER™ 在实验室中运行英飞凌 FS800R07A2E3 绝缘栅双极晶体管逆变器模块，用其获得芯片内部的准确测量。

此模块包括三个半桥级，我们选择第三级低边驱动绝缘栅双极晶体管进行测试。绝缘栅双极晶体管中的功率损耗在两个完全相同的芯片中，以便更好地管理功率。元器件以饱和状态测试；也就是说，我们施加 15 伏特 (V) 的电压来开启门级，并在 500 安培 (A) 制热和 500 毫安 (mA) 传感器电流之间切换，以便在半导体器件上触发良好的功率步长。

样本既有强电流电源端子（称为 3 和 N3），也有分别连接绝缘栅双极晶体管发射器和连接器的单独传感器端子（称为 C6 和 E6）。这些单独的传感器端子让我们可以真正创建开尔文探针设置，其中电源和测量线是分开的，可以更加准确测量芯片压降。

我们假设金属化过程中的压降可能显著影响瞬态热测试的结果。为了对此进行检测，我们对主电源引脚 (3-N3) 供电并传感，然后对引脚 3-N3 供电的同时传感专用传感器引脚 C6-E6，以此来测试样品的热电阻。由于系统的温度敏感性主要取决于所测试的半导体，两种情况的测量温度响应相同。但如果考虑测量的内部金属化，我们可以得到大约 900 瓦 (W) 的加热功率，而如果直接从半导体测量，只能得到大约 700 W。

测量引脚的位置也严重影响所计算的结构函数，或者是所测量的热电阻。为了验证这种影响，我们为此设置创建了精确的 3D 电热模型并对其进行分析。

调节和校准模型

准确、稳态的 3D 电热模型需要明确定义的电热电阻属性，这就意味着需要确定并准确规定几何结构、电阻率和热导率值。为实现这种定义，我们根据测量的芯片温度组合、芯片对单位功率步长（热阻曲线）的瞬态温度响应和跳变点压降调整 3D 电热模型。我们在引脚 N3、0V 的引脚 3 应用 500-A 边界条件，并使用引脚 E6 和 C6 来监控绝缘栅双极晶体管芯片的压降。

其中一个绝缘栅双极晶体管有源层的层叠结构如图 1 所示。模型提供足够详细的表示，包括芯片金属化、有源层、芯片、焊料、直接覆铜 (DCB) 基底等。我们指定了所有绝缘栅双极晶体管无源层和二极管有源层以及陶瓷层作为绝缘体，将电路和供电网络、金属化层、焊线和芯片以及两个绝缘栅双极晶体管的有源层隔开。

绝缘栅双极晶体管模块在基板底部集成了柱状鳍片散热器，通过水冷套冷却。我们没有对柱状鳍片散热器和水冷套显式建模，而是定义了基板底部的接触热阻，其与柱状鳍片散热器安装所在基板固定温度边界条件之间的范围。所有金属物体的电阻材料属性均已明确定义特性，包括温度相关系数。

两个主要未知数是有源层和掺杂硅基芯片的电阻。前者是最为敏感的参数，是校准的基础。后者的数值依赖于掺杂浓度，但比有源层数值小很多，因此没有那么敏感。我们假设值为 $2e-5$ 欧姆 / 米。

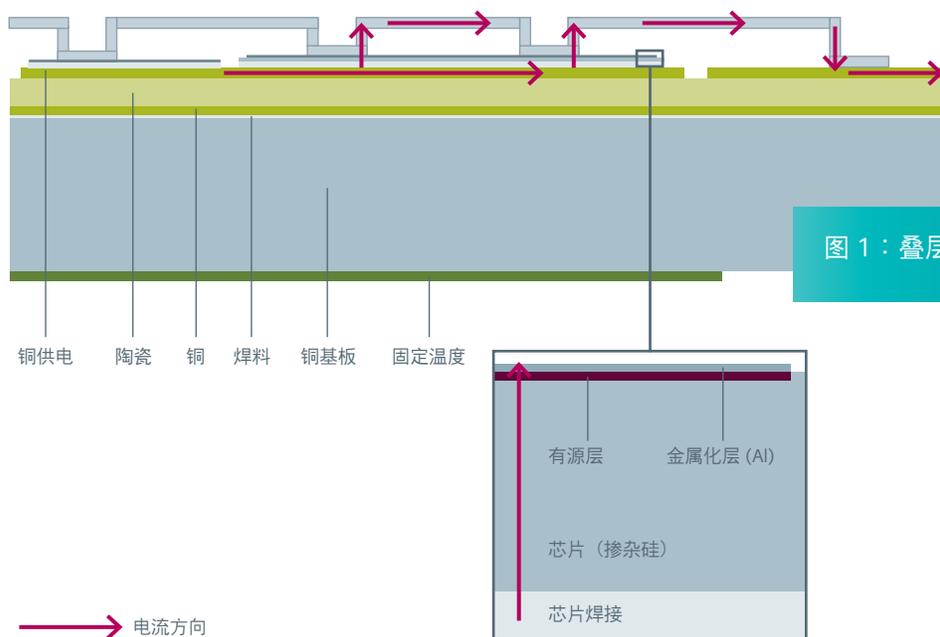


图 1：叠层和电流方向。

分析导热材料属性时，我们发现对于预测温升最为敏感的两个值为表示尚未建模的柱状鳍片散热器的陶瓷和接触电阻。因此，我们的校准过程包括改变有源层电阻、陶瓷导热系数和厚度以及固定温度边界条件的接触电阻。我们一直在改变参数，直到两个测量压降（N3-0 和 E6-C6）、平均稳态芯片温度、热阻曲线和积分结构函数的 T3STER 测量值被 Simcenter Flotherm™ 软件中的 3D 模型复制为止。

对于最终校准，我们将厚度为 740 微米的陶瓷层导热系数设为 105 瓦特 (W)/ 米开尔文 (mK)，绝缘栅双极晶体管有源层的有效电阻设为 0.115 欧姆 / 米，表示柱状鳍片散热器和水冷套的接触电阻设为 $3.5e-5$ 平方米开尔文 (m^2K)/ 瓦 (W)。尽管所有可触及几何体都可以测量，但我们没有进行破坏性的分区测量。因此，有源层的有效电阻、导热系数和陶瓷厚度的精确值可能不够精确，但由此生成的有效电阻和导热系数均已校准（表 1）。

为了模拟系统中功率增加时的瞬态温度响应（热阻曲线），我们在进行 T3STER 测量时使用了相同的方法。我们从 $t = 0$ s 的驱动电流稳态电热解算方案开始，仅对热进行了瞬态仿真并记录了相应的芯片平均温度与时间曲线关系图 2)。尽管在现实中，瞬态测量开始时 T3STER 向下调节至感测电流，但是这种电流足够低，以致我们对于无自热效应存在的假设也成立。

尽管瞬态热响应测量的校准在理论上可以校准瞬态热特性模型，我们的初衷是进一步确认绝缘栅双极晶体管之外的热材料属性。这是为了确保预测稳态温升确实是正确的，而非由于叠层中大量出错的热阻总和碰巧形成正确的总热阻 (R_{th})。这种方法帮助我们确保通过堆叠形成正确的温度预测，而非仅凭芯片温度。

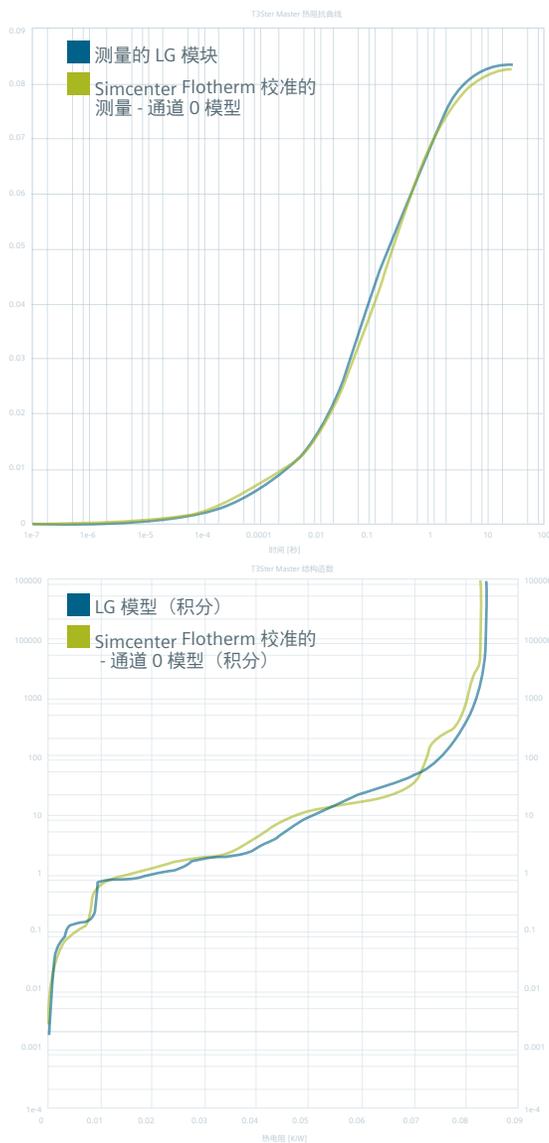


图 2：热阻曲线和积分结构函数校准比较。

我们所了解的功率损耗

在低电流情况下（譬如传感），绝缘栅双极性晶体管的电阻比电路其他部分高出很多。绝大部分的功率损耗发生在芯片上。对于强电流情况，芯片的相对电阻会随电路其余部分降低，而认为所有耗散功率都是在芯片损耗的观点是错误的。图 3 以 500 安培的驱动电流为例，显示了模拟功率分配。

在总计 912 瓦的功率消耗中，64% 损耗在两个绝缘栅双极性晶体管的有源层，4.7% 损耗在焊线，1.4% 损耗在金属化层，而剩余 29.6% 损耗在供电电路其余部分。覆盖整个电路的 N3-0 以及覆盖绝缘栅双极性晶体管芯片和焊线的 E6-P6 这四个柱状鳍片散热器的电压测量值比率 $1.4/1.812 \text{ V} = 77\%$ ，为我们初步显示了有源器件和供电电路之间的功率分配。

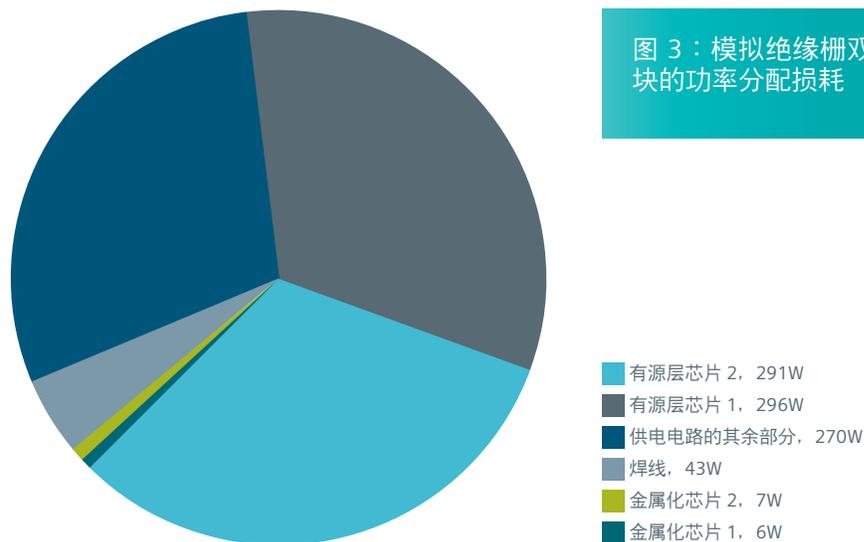


图 3：模拟绝缘栅双极性晶体管模块的功率分配损耗

有源层功率损耗效应

对于经过有源层的电流，金属化层在传播电流到附着焊线以及焊线附近到供电电路回流部分的效能，由电流分布及有源层功率分配决定。图 4 显示了每个焊线承载电流的不均匀性。

靠近 0-V 复位销（左上角）的焊线承载的电流比那些离复位销最远（右上角）的焊线多出接近 20%。我们之所以这么认为，是因为靠近 0-V 复位销的焊线比那些远离复位销的焊线电阻降低。

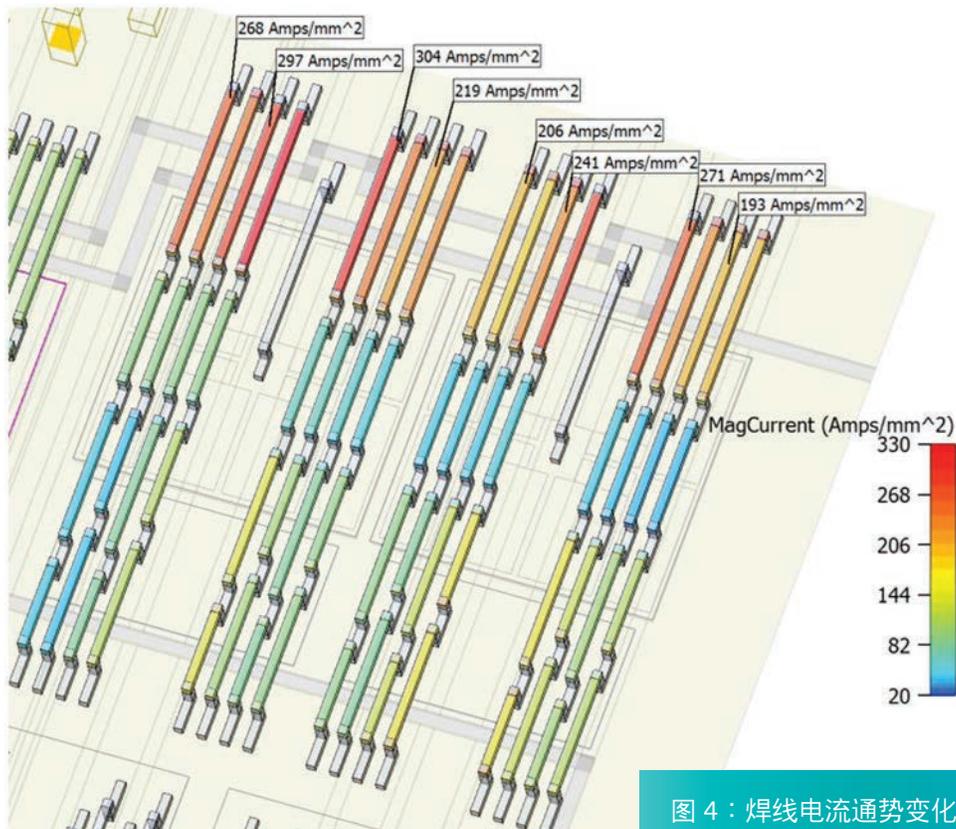


图 4：焊线电流通势变化。

比较芯片中的假设总功率损耗

仅对热进行仿真，可能包括预估功率损耗及其位置。总功率损耗可以通过测量整个电路的压降，然后乘以已知电流得出。但是，如果假设所有消耗功率都是在有源层耗散的，并且耗散均匀分布，这就可能导致相当大量的温度预测错误（图 5）。正如此图所示，这种假设导致预测温升最多可能超出 34%，最高温度所在位置可能偏离，并且整个有源层的温度变化可能高出 30%。

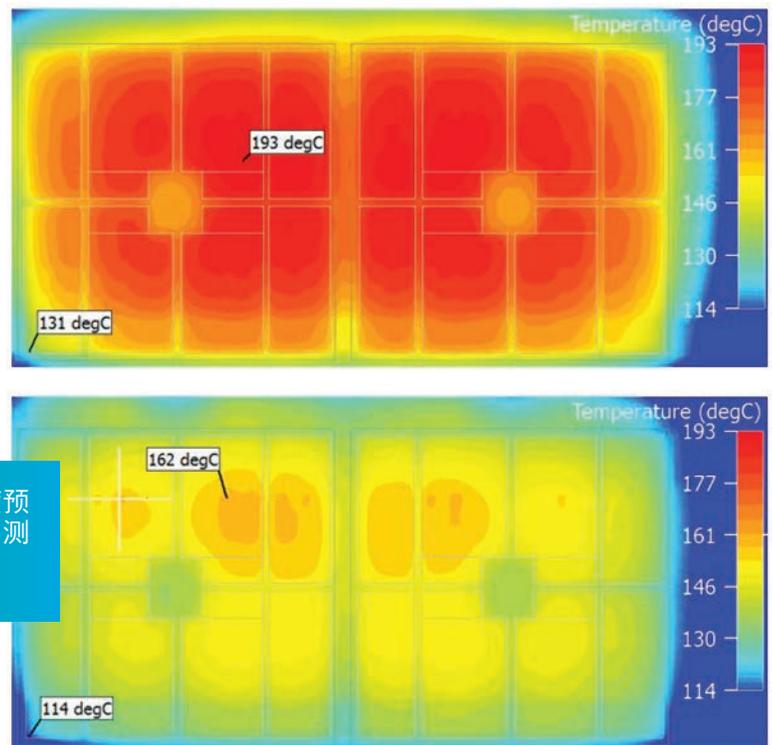


图 5：完整功率均匀损耗的温度预测（上图）和电热方法温度预测（下图）。

使用线性电气模型的局限

由于 Simcenter Flotherm 只假设一种电阻材料属性，而绝缘栅双极晶体管呈现非线性输入功率关系，仅使用仿真校准绝缘栅双极晶体管之类器件中的单个驱动电流会受到限制。尽管这种电阻可能与温度相关（线性），它会将一般应用限制为通过原点呈线性输入功率特性的材料。总功率损耗很容易测量（全电路压降测量配合驱动电流知识）。校准方法通过调整有源层电阻率，使其与驱动电流输入功率曲线相交，从而确定（电）工作点（图 6）。

校准有源层的有效电阻，但驱动电流相同而结温不同（通过控制水冷套环境温度），可以确定该电阻的温度相关系数。将芯片温度和电阻的局部变化考虑在内，这还可以细化有源层预测功率损耗的精确度。由 I 与 V 与 T 特性曲面定义的更为广义的电子材料属性允许在仿真中处理所有范围的工作电流，包括温度相关电流。

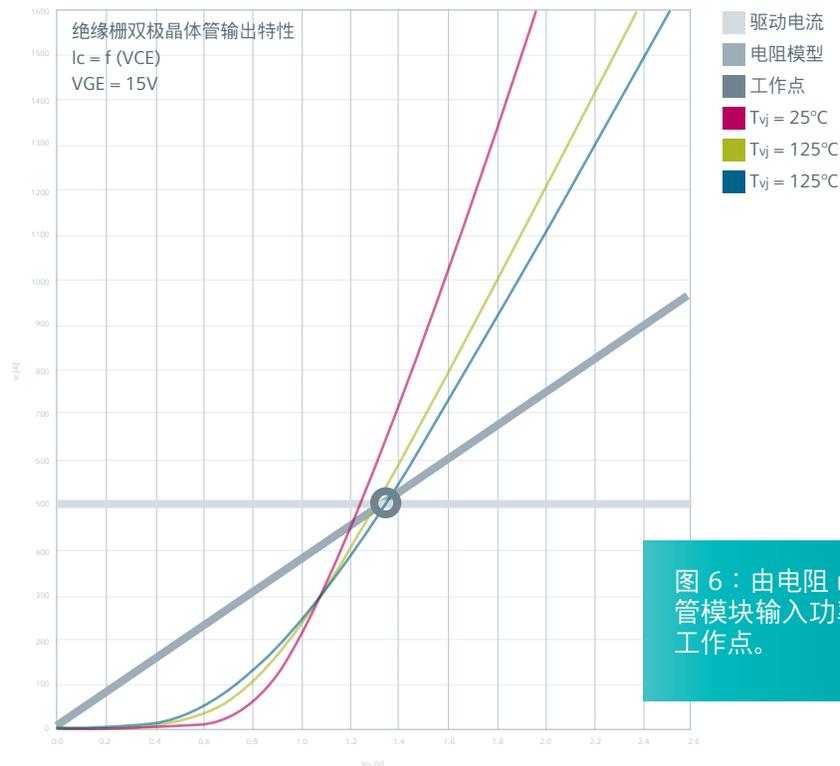


图 6：由电阻 m 和绝缘栅双极晶体管模块输入功率特性交点推导出的工作点。

克服对开关过程中总功率损耗进行建模的局限

绝缘栅双极晶体管模块工作时，总功率损耗包括直流损耗和切换开关时产生的损耗。从 3D 瞬态建模角度而言，同时考虑解算电子开关时标和系统其余部分的热时标，并非轻而易举之事。

替代方法可以是，采用 ELDO 之类电路仿真器执行完整瞬态电子仿真。直流损耗应从预测实时功率曲线中扣除，留下开关损耗曲线。随后可以根据时间平均值推导积分开关损耗功率。此值随后可以作为稳态功率源实施，与 3D 电热模型中的有源层对象搭配使用，从而可以考虑除电热预测直流损耗以外的时间平均开关损失。

结论

以前的热仿真方法假设所有功率损耗都耗散在半导体中，这增加了此类功率电子产品应用中温升预测 34% 的错误。在 T3STER 校准的 Simcenter Flotherm 仿真模型中求解全电路，能够预测功率分配，使得温升预测高度精确，并能用于判断提议设计在工作条件下是否符合热性能要求。这种组合测试和仿真方法对于提高数字化双胞胎精度大有裨益。

Siemens PLM Software

总部

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

美洲

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

欧洲

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

亚太地区

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

关于 Siemens PLM Software

Siemens 数字化工厂事业部旗下业务部 Siemens PLM Software 是全球领先的软件解决方案提供商，致力于推动行业数字化转型，为制造商创造新的机会并实现创新。Siemens PLM Software 的总部位于美国得克萨斯州普莱诺市，在全球拥有超过 140,000 个客户，并与所有规模的企业协同工作，帮助他们转变将想法变成现实的方式、产品实现方式以及使用和了解运行中产品和资产的方式。有关 Siemens PLM Software 产品和服务的详细信息，请访问 www.siemens.com/plm。

www.siemens.com/plm

©2019 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Siemens、Siemens 徽标和 SIMATIC IT 是 Siemens AG 的注册商标。Camstar、D-Cubed、Femap、Fibersim、Geolus、GO PLM、I-deas、JT、NX、Parasolid、Solid Edge、Syncrofit、Teamcenter 和 Tecnomatix 是 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其子公司在美国和其他国家/地区的商标或注册商标。Simcenter 是 Siemens Industry Software NV 或其子公司的商标或注册商标。所有其他商标、注册商标或服务标记均属于其各自持有方。

75476-81086-A4-ZH 11/19 LOC