

延长大功率电气系统的使用寿命

结合实验测试与多物理场仿真，ABB 半导体的研究人员重新设计了用于大功率电气组件的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）模块以延长该设备的使用寿命。

作者：DEXTER JOHNSON

传输经过火车机车的高电流及电压浪涌会给其中的大功率电气系统造成巨大的应力冲击，这些电气系统必须要能够承受这些冲击的考验。绝缘栅双极型晶体管（IGBT）是这些电气系统的核心，它是一种支持快速切换的高效电子开关，主要负责向机车系统传输能量。当火车从一个站开向下一个站时，IGBT 电源模块将经历反复的电、热以及机械疲劳，这会降低模块的性能，最终使其失效。

“典型情况下，设计负责驱动机车的牵引电机时，目标是要保证设备能承受 30 年极端条件下的考验。”位于瑞士伦茨堡的 ABB 半导体的首席研发工程师 Samuel Hartmann 解释说。如果 IGBT 模块在牵引电机的使用期内发生磨损，就必须更换。Hartmann 和他的同事们希望能满足牵引电机较长使用寿命的要求，提升系统的可靠性，他们正借助计算机仿真来更好地理解如何提升 IGBT 模块的电力循环性能。



图 1: ABB HiPak 电源模块，额定阻断电压 6500 V，额定电流 750 A。

“我们的团队正在寻找能够提升 ABB HiPak 电源模块性能的方法。”Hartmann 说（见图 1），“这些模块由多个并联的 IGBT 芯片构成，当模块处于‘开’状态时，会传输较大的电流，当处于‘关’状态时，将承受非常高的电压。”这些模块也可以应用于诸如工业传动和可再生能源等领域。

“当用于机车时，IGBT 电源模块会暴露在高温环境中，因此，不同零件之间的连接点会由于热机械应力的影响而变弱。”Hartmann 介绍说，

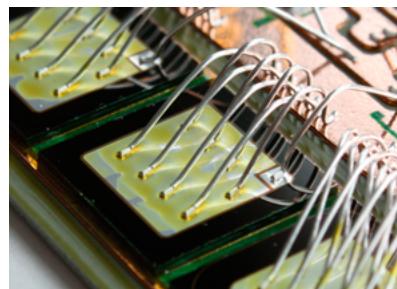
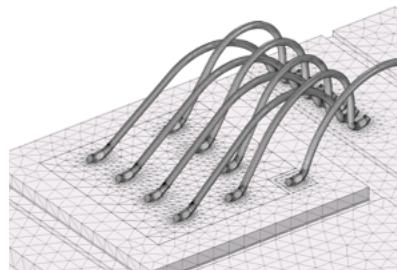


图 2: 上: 参考焊线布线的 COMSOL® 软件模型及网格剖分。下: 参考发射器照片。

“在最薄弱的结点失效后，导线会从发射器上脱落，造成电接触断开，半导体元件及其封装间剩余的互联导线将传输更高的电流。最终，剩余结点中热机械应力的增加，会造成连锁故障。如果我们强化最弱的结点，

就可以延长器件的整体使用寿命。”通过延长 HiPak 电源模块的使用寿命，ABB 可以减少用于这些电机中所需模块的数量，以达到 30 年的使用寿命，并且节省资源和减少维修时间。

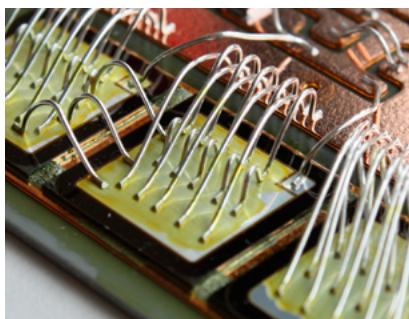
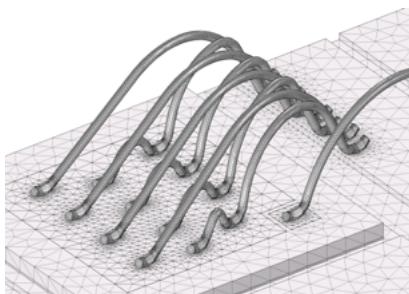


图 3: 上: 针脚接合焊线布线模型及网格剖分。下: 使用针脚接合焊线布线的部分 HiPak 电源模块图片。

» 仿真使实验结果变得更清晰

ABB 的 HiPak 电源模块通常包括基板、电路板、IGBT 和二极管芯片、焊线和导体引线。为延长电源模块的使用寿命，Hartmann 探索了几种用于增强电路板与发射器键合点间导线连接耐用性的方式。

“我们研究了两种方式来改进设计。” Hartmann 介绍说，“在第一种情况下，我们查看了焊线和发射器间的不同连接方式，希望了解针脚接合技术能否预防零件性能的下降，以及能否延长设备寿命。”图 2 和图 3 显示了分别采用常见的参考焊线布线与针脚接合布线的元件照片和剖分网格后的模型。

“对于第二种情况，我们使用新的连接技术在发射器的硅晶片和铝制焊线之间焊入了一个应力缓冲器。” Hartmann 继续说，“应力缓冲器的热膨胀系数（CTE）在硅和铝之间，因此能降低热载荷和机械载荷。”

“我们借助实验方法评估了这些焊线连接的几种变形，并使用多物理场仿真解读了某种设计为什么更优于其他设计。”

—SAMUEL HARTMANN, 首席研发工程师, ABB 半导体

借助多物理场仿真，ABB 团队更好地理解了 IGBT 芯片性能下降的潜在机理，比如不同设计反复暴露于电力循环测试时的电-热和热-机械响应。“电力循环能力越高，设计的耐用性与可靠性越好。” Hartmann 解释说。

“我们借助实验方法评估了这些焊线连接的几种变形，并使用多物理场仿真解读了某种设计为什么更优于其他设计。” Hartmann 相信，ABB 对 COMSOL Multiphysics® 仿真软件的使用是他们设计成功的关键。

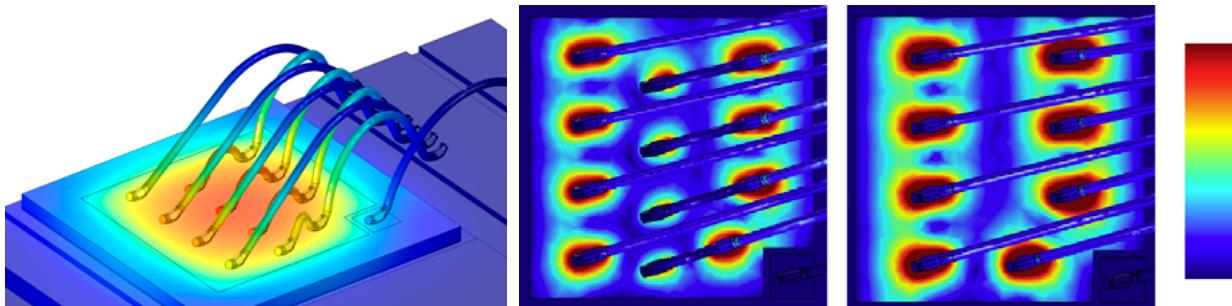


图 4: 左: COMSOL 结果显示了针脚接合布线的温度分布图。右: 针脚接合布线和参考布线中的电流密度，显示出新设计中焊脚周围的电流降低了。

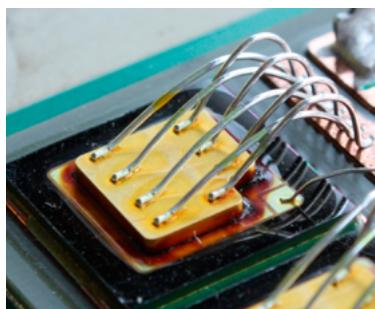
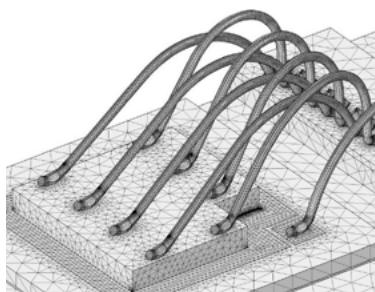


图 5：上：发射器触点加固模型及网格剖分。下：发射器触点加固元件的图片。

» 用仿真探索 IGBT 模块的不同设计

在首次实验中，ABB 团队测试了两种不同的焊接技术：参考焊线布线（见图 2）和针脚接合布线，此时焊线会被多次焊接到芯片表面（见图 3）。

借助仿真和实试，Hartmann 对比了三种不同的针脚接合布线和参考布线。“不出所料，我们发现当单个芯片上有多条焊线时，焊线、尤其是焊脚内的电流密度降低了。”Hartmann 介绍说，“在仿真的帮助下，我们非常深入地了解到：针脚接合布线并没有降低温度梯度或机械应力，性能的改进是由于电流密度降低，而这又是因为芯

片焊脚周围金属镀层中的电流密度降低了。”

额外的焊接为电流提供了更多通过焊线的路径，因此减少了每条焊线耗散的电流（见图 4）。

“新的焊接设计为我们提供了全新的 IGBT 设计，它的电力循环性能是参考布线的 4 倍。我们的一些 HiPak 电源模块已经应用了这种新设计。”

在第二次实验中，Hartmann 和他的同事们对比了直接焊在芯片上的焊线与焊在芯片上所附的金属板上的焊线，金属板用来加固发射器（见图 5）。

在仿真的帮助下，Hartmann 发现加固发射器接触后，焊接接触面中焊线承受的电流密度、温度变化和机械应力都远低于参考模块

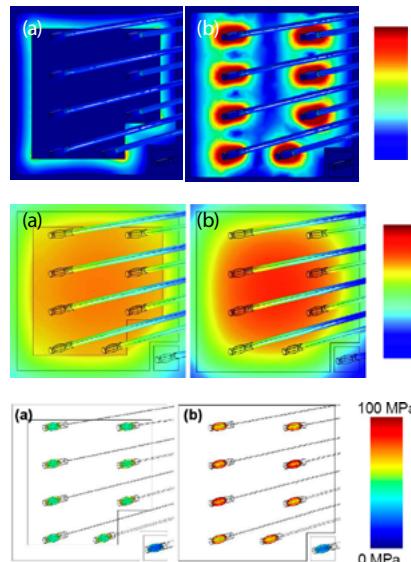


图 6：ABB 开发的 COMSOL 模型的电流密度、温度变化及 von Mises 应力模拟结果，从下到上分别是在 (a) 加固型和 (b) 参考发射器接触布线中前端金属镀层和焊线的焊线-芯片接触面处的情况。



Emre Oezkol (左) 和 Samuel Hartmann (右) 的手中分别拿着电路板和 HiPak 电源模块。

“在加固型 IGBT 模块中，我们发现焊线的循环性能是标准模块的十倍。我们借助仿真验证了机械应力的降低，这也是耐用性大幅提升的原因。”

— SAMUEL HARTMANN

(见图 6)。这大幅降低了焊线从发射体上脱落的概率。

“在加固型 IGBT 模块中，我们发现焊线的循环性能是标准模块的十倍。” Hartmann 说道，“我们借助仿真验证了机械应力的降低，这也是耐用性大幅提升的原因。”

» 延长 IGBT 电源模块的使用寿命

丝焊仿真的结果及新型的焊接技术延长了 ABB 电源模块的使用寿命，针脚结合布线的使用寿命延长了 4 倍，发射器接触加固布线的使用寿命延长 10 倍。使用寿命的延长转化为每个设备更大的功率输出，进而帮助 ABB 电源模块的用户降低了成本。

“由于我们的新模块提供了改进型焊线布线，如果电力循环能力得到提升，” Hartmann 解释说，“只需要较少的电源模块就能做出一个拥有 30 年使用寿命的标准牵引行业用电机。这会直接降低机车成本，并增强我们电源模块的竞争力。”

焦耳热和热膨胀

作者：HENRIK SÖNNERLIND

电流会因为电阻损耗而产生热，即焦耳热。由于电阻通常与温度有很强的依赖关系，所以只有同时求解传热问题和电问题才能精确找出温度和电流的分布。

发热的影响之一便是热膨胀，它会引起变形。之后，几个因素可能会诱发出大的应变和应力。热膨胀系数不同的材料产生的变形将不兼容，而且单种材料内部也可能存在较大的温度梯度。

在一些情况下，热分布还会受到结构变形的影响。例如，当对象相互接触，或大的变形造成电和热边界条件改变时，就将产生剧烈的形状改变。如果加热循环反复发生，对应的应力和应变循环也将重复发生，这最终会使材料发生疲劳失效。

在 COMSOL Multiphysics® 软件中，您可以选择结构力学‘焦耳热和热膨胀’物理场接口来直接耦合分析这些效应。

这样一来，三个将产生影响的物理场接口会被增加到应用中，即固体力学、固体传热和电流，同时还会通过多物理场耦合节点增加必要的多物理场耦合。

您可以设定这三个物理场接口的求解方法。其中一个方法是首先在瞬态研究中同时求解电流和温度，然后在稳态研究中求解结构力学问题。因为最高的应力可能在热



循环的任意时间点出现，所以需要每隔几个时间步长检查一次应力值。

计算得到的应力值已足够满足定性比较的需求，但如果继续增加疲劳接口的话，您还将能够进行使用寿命的预测。