

找出卫星系统中的电弧区域

卫星在轨道中运行时会发生电弧放电, 这种现象可能导致系统故障, 但对其进行预测却极为困难。俄罗斯强电流电子学研究所的工程师借助多物理场软件, 找到了故障最初发生的临界区域, 从而为机载设备提供了及时的保护。

作者 **GEMMA CHURCH**

波音卫星系统 (Boeing Satellite Systems) 公司在 1995 年推出了一系列新型的通信卫星平台 (satellite buses), 平台包含电力系统、控制系统和推进系统。研发人员将高压母线与 100 V 的稳定电源相连接, 取代了原先 27 V 的标准电压。这一全新的配置通过增加工作电压降低了工作电流, 并相应地减少了导体中的电阻损耗。然而这一改进却给卫星的电气系统带来了潜在的灾难性故障——电弧 (图 1)。

位于俄罗斯托木斯克 (Tomsk) 的强电流电子学研究所 (Russian Institute of High Current Electronics) 的研究员 Vasily Kozhevnikov 解释说: “新的工作电压标准导致电路板上的元件之间可能会产生电弧现象。当初在设计中为了尽可能地减轻卫星的质量, 并没有在电路板机箱的内部空间填充绝缘体, 也没有将内部空间建造为真空环境。然而, 这种设计却可能导致电弧放电或放电连锁反应, 从而影响到大量的机载设备。”

“车载卫星系统内的电弧现象通常会

导致局部或整体故障。在大多数情况下, 这些故障会导致卫星报废。”他补充道。

这项研究与极端条件下的气体放电现象密切相关。在极端条件下, 电气设备的运行并不会完全遵循常规的物理原理。举例来说, 放电有时会发生在阈值 (通常被称为 Paschen 最小值) 之下, 这时的电压较低, 通常并不足以在两个电极

之间引发放电或电弧。

Kozhevnikov 表示, “我们认为, 这项研究将来可以用于诊断压力、电离水平等各类外部参数对电气设备运行状况的影响。除航天工业和太空科学之外, 此项研究还具有更为广阔的应用前景。”

随着电气系统越来越多地应用于极端环境, 电弧已不仅仅是民用航天工业面临的问题, 它将影响到所有需要长时

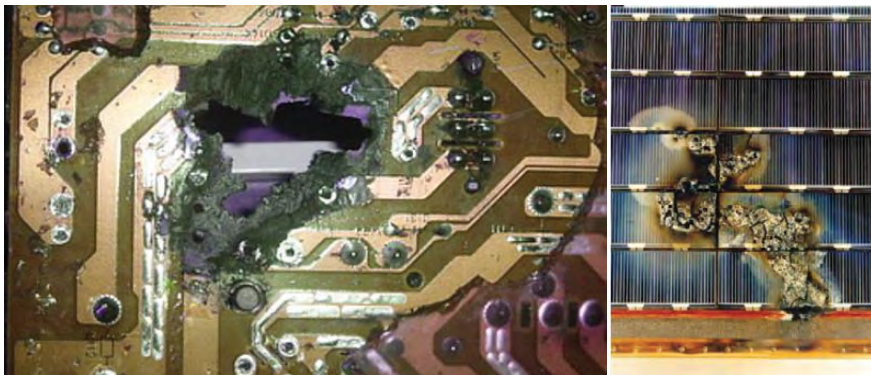


图 1. 工作电压为 100 V 的电源中因电弧造成的损坏。

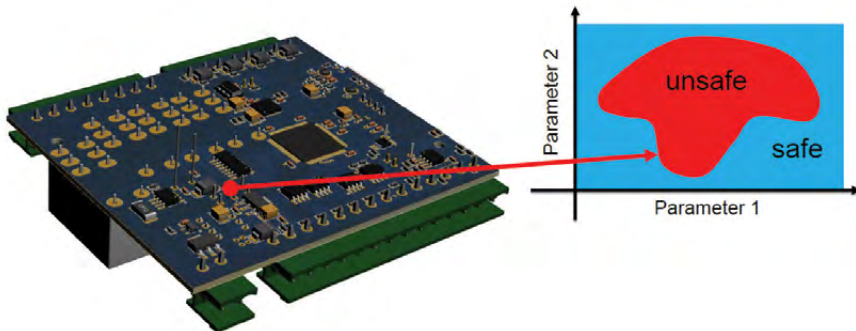
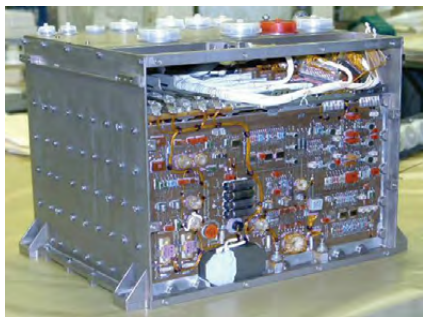


图 2. 卫星设备专用电路板示例图。临界区域的宽度不足 5 mm。强电流电子学研究所的工程师必须确定不安全的工作条件范围以及相关特性, 并据此来设计能够在卫星上运行且不易遭受破坏的系统。

间自动运行、且对容错能力要求高的电气设备。因此，电弧问题解决方案的适用范围已从太空中的卫星延伸到了地面系统和水下设备。

⇒ 寻找临界区域

为了防止自持电弧破坏机载电气设备，就必须确定发生自持放电的区域，即所谓的“临界区域”。一旦找到了潜在的问题区域，工程师便可进一步对触发电弧放电的原因进行研究。

实验室研究无法完整复现空间轨道内的运行参数范围，因此无法胜任识别电子热区这一任务。仿真，作为唯一可选

“在 COMSOL 的帮助下，研究人员无需再自行编写计算代码，便能够顺利地执行研究。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”

— VASILY YU. KOZHEVNIKOV, 强电流电子学研究所助理研究员

的研究工具，也依然面临着巨大的挑战。一台常规的机载电气设备通常安装有多块印刷电路板，这些电路板被置于金属外壳之中，并分布在大片区域内（图 2）

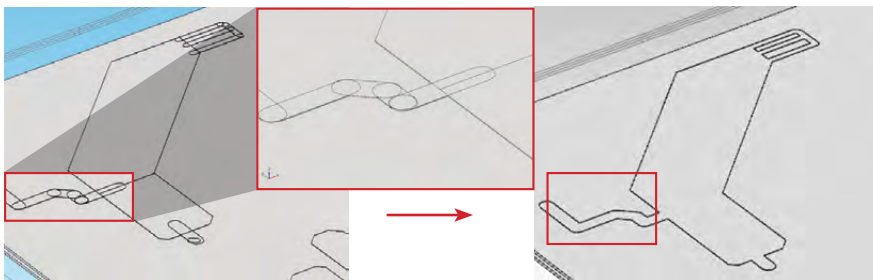


图 3. COMSOL 软件的几何修正功能。

。Kozhevnikov 解释说：“对放电现象进行数值仿真分析是识别潜在自持放电区域的唯一方法。然而，放电既是多物理场问题，又是多尺度问题。考虑到所需要的计算资源，分析如此大规模的仿真问题是极其困难的。”

⇒ 捕捉几何结构的误差

托木斯克的研究团队致力于寻找一种既准确又实用的计算方法。他们提出了一种基于计算工具的“分解”方法：不对整个电气设备运行完整的直流放电仿真，而是创建一个定制化的仿真 App，这个 App 可以自动分割并分析设备模型，找出最可能的临界区域。为了实现这一目标，他们采用了 COMSOL Multiphysics® 软件及内置的“App 开发器”工具来创建用于支持整个模拟过程的多物理场模型。

前处理是一个重要的建模步骤，其作用在于施加正确的边界条件和导入真实机载电气系统的详细几何结构。

研究团队在“App 开发器”中利用自定义的三维宏模型方法 (3D macromodel method) 执行了前处理。此外，他们还采用了自己导入的引擎模型，可自动修正对象边界。Kozhevnikov 解释说，三维宏模型方法包含了导入功能和自动修正对象边界的功能（图 3）。若没有自动修正功能，这些误差可能会导致无法运行仿真分析。

⇒ 解析等离子体物理问题

完成了前处理后，研究人员采用的建模方法包含以下三个阶段：对三维模型中的潜在临界区域进行初步静电分析；利用关联二维模型推算出场增强区域，并对临界区域进行定义；对临界区域进行直流放电模拟，进一步研究重要参数。

最初选择使用 COMSOL Multiphysics 是因为只有这款软件能够全面地描述二次直流放电理论模型的全部特征，而且还支持用户修改必要的参数。

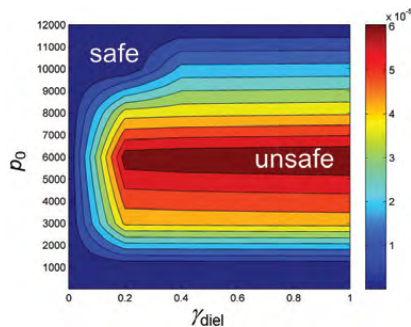
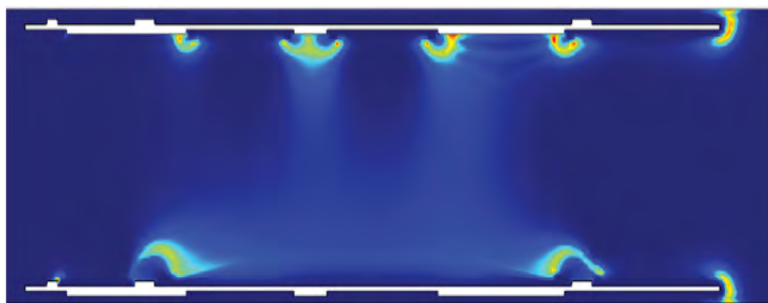


图 4. 左图：自持放电阶段的电子密度分布，这个二维模型来源于在卫星电源三维模型中定义的临界区域；右图：临界参数示例图显示了临界区域内压力与电子发射之间的关系，彩色图指示放电电流密度的水平。

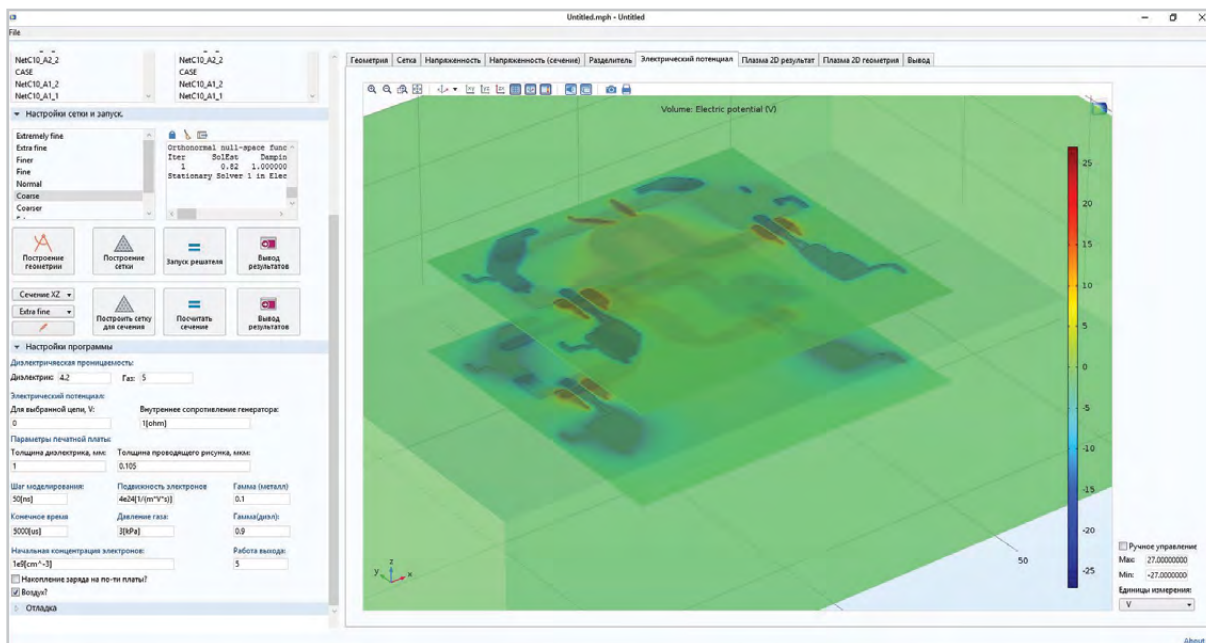


图 5. 借助 Kozhevnikov 开发的多物理场 App，研究人员可以修改压力和电子发射等参数，从而找到自持放电最可能发生区域。此 App 将电弧定位与特定放电阶段的研究相结合，无需进行全尺度的直流放电仿真，其中提供了一系列结果，包括整个电路系统的电势。

研究人员通过仿真对电子密度的分布进行了分析，并确定了临界区域的位置（图4）。Kozhevnikov 解释说：“COMSOL Multiphysics 从各方面满足了研究项目中对运行电压范围分析的需求。相比于粒子模拟（particle-in-cell，简称 PIC）仿真，COMSOL 仿真在等电压和高压分析方面更加快速、简便。”

“PIC 仿真的计算成本过高，显然并非解决此类问题的最佳方案。简化模型配置（例如气体放电二极管）的方法虽然可行，然而达到中等压力后，这种方法所耗费的时间可能是 COMSOL 仿真的 5~20 倍。对于此类结构，COMSOL 的平均计算时间少于两个小时。”

图 5 展示了研究团队创建的定制化仿真 App。仿真 App 中隐藏了构建模型时涉及到的复杂物理场，因此用户在使用仿真 App 时只会接触到与自己分析工作相关的参数，但是用户可以添加自定义命令和算法。

Kozhevnikov 表示：“具体来说，在

COMSOL 的帮助下，研究人员无需再自行编写计算代码，便能够顺利地执行研究，而这本来是一项非常复杂的工作。我们期待这款软件未来能在气体放电研究中发挥更大的作用。”此外，CAD 导入功能、“App 开发器”等丰富的前处理和后处理工具也是团队选择 COMSOL 软件的原因。

⇒ 仿真对轨道空间和跨学科研究的影响

仿真分析与物理实验相结合的方法，为研究提供了更广阔的空间。Kozhevnikov 进一步解释说，“如果将来能够进行无损检测，COMSOL 仿真将通过排除非关键零件的方式来缩小实验的测试区域。在我们的项目合作框架下，强电流电子学研究所真空电子实验室的同事们正在致力于无损检测的开发。”

“在航天器产业中，自

动化软件系统的适应性应当能够保证软件自身的长期运行。”他补充道，“航天器产业的标准会经常变更，因此很难解释清这些变化带来的全部影响。我们虽然已经解决了电弧诊断问题，然而随着电压上升，我们预计还需要对部分机载电气设备进行设计，以使其能适应新的运行条件。简单来说，如果某些设备的运行状况与‘正常情况’存在明显差异，工作人员便需要以某种方式对其结构进行重建。我们的仿真 App 为印刷电路板的重新设计提供了参考建议，使它能更好地抵抗电弧。仿真 App 亦可用于设计具有容错性的电气系统。”



Vasily Yu. Kozhevnikov 于 2008 年在俄罗斯托木斯克国立大学获得理论物理学博士学位。自 2008 年起，他一直担任俄罗斯科学院西伯利亚分院强电流电子学研究所理论物理实验室（托木斯克）的助理研究员。从 2012 年到现在，他使用 COMSOL 软件进行了大量的研究。