

# 仿真 App 加速定制电容器的设计进程

美国 CDE 公司的工程师们利用仿真 App 对定制化电容器的设计进行了评估和优化。这些仿真 App 让设计和制造部门的工程师们摆脱了复杂计算模型的制约，能够在现场对器件的配置进行快速探索。

作者 SARAH FIELDS

电容器是一种被广泛用于电子设备中的电子元件，其应用范围还包括那些需要在极端条件下工作的设备中。不同的应用领域对电容器的需求各不相同。电容器有时需要符合严格的功率规格，或能在特定的温度范围内工作，甚至有时必须由特定的材料制成。

CDE (Cornell Dubilier Electronics) 公司是全球规模最大的定制化电容器制造商之一，其开发的电容器不仅被应用于风力涡轮机和太阳能等民用设备中，在战斗机和雷达系统等对装置精度要求极为严苛的军事和航天领域的设备中也有着广泛的应用。在定制化电容器的开发工作中，CDE 公司的工程师使用了数学建模和定制化的仿真 App 对电容器的设计进行微调。

CDE 公司的研发主管 Sam Parler 解释道：“通过使用 COMSOL Multiphysics 及



图 1. 铝电解电容器。电解质绕组由铝箔和纤维素隔膜构成，并呈现热各向异性。

其‘App 开发器’工具，我们可以建立高精度的多物理场模型，并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试，从而选定最优设计。”

## ⇒ 何时开始升温

CDE 公司针对不同的应用领域分别设计了包含一个或多个元件的电容器，例如由铝箔和纤维素隔膜组成的电解质绕组、由偏置的金属化介电膜构成的静电绕组、交错叠加的金属箔片，以及云母等电介质（图 1）。

发热现象是电容器设计人员面临的一个重要问题。过多的热量会大幅缩短电容器的寿命。如果电容器的工作温度比最大设计温度值高 6~10 °C，其使用寿命将会减少至原有寿命的一半。当电流通过铝箔绕组时会产生焦耳热，如果忽略这一因素，将无法全面地了解电容器内的热量分布。因此，CDE 公司的工程师希望通过仿真将发热量降至最低水平，并优化装置的散热性能。

为了达到上述目的，设计人员必须对电容器中复杂的材料组成进行精确表征。电容器常常包含多达六种不同的材料，其中部分材料具有各向异性的特征。在某种电容器的设计中，绕组由纤维素隔膜和铝箔构成，并表现出各向异性导热性能，其轴向的导热系数比径向高出两个数量级。

得益于 COMSOL Multiphysics® 的灵活性，Parler 可以直接输入张量形式的导热

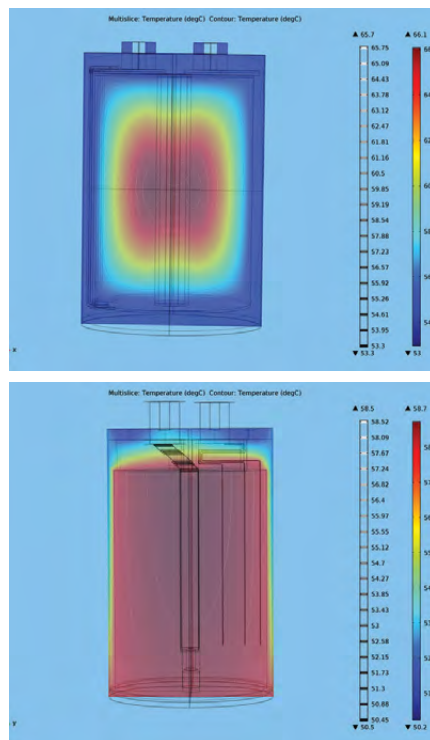


图 2. 对比金属化聚丙烯薄膜电容器（上图）和铝电解电容器（下图）的热分布情况，二者的几何尺寸均近似为 76 mm × 120 mm，并且在 45 °C 环境中均具有 5 W 的耗散功率。

系数，从而获取电容器中准确的热分布。以典型的简单电容为例，可近似地认为沿 z 轴方向的圆柱形电解质绕组的电容张量是正交各向异性的，并将其导热系数设置为  $\{1,1,100\}$  [W/m/K] 的对角张量形式。

在一次测试中，Parler 采用了两种电力电容器，分别为金属化聚丙烯（塑料）薄膜电容器和铝电解电容器（图 1 和图 2）。这两种电容器的尺寸和额定纹波电流相似，但结构完全不同。

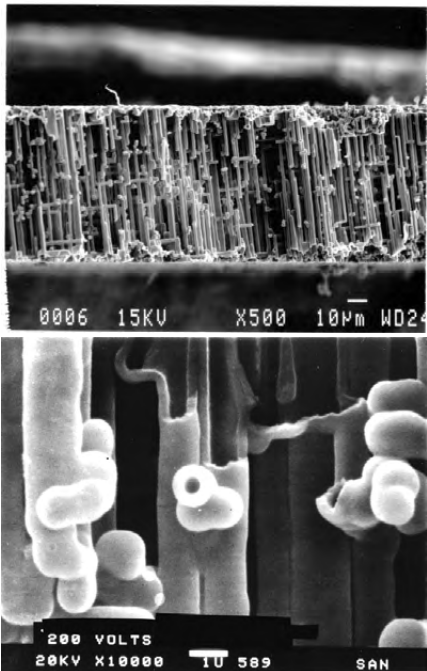


图 3. 大型铝电解电容器的同轴微结构示意图。其中电介质为氧化铝( $Al_2O_3$ )，它通过高度蚀刻铝箔的曲折表面阳极化处理制成。在上图中，氧化铝介电管周围的铝已被溶解。

塑料薄膜电容器(图 2 上)的轴向导热系数比铝电解电容器(图 2 下)低得多。借助多物理场仿真, Parler 可以准确地计算出在给定的耗散功率下, 塑料薄膜电容器将会比铝电解电容器的温度高多少。

### ⇒ 使用形状优化技术揭示微结构

CDE 公司开发的电容器通常是技术创新的产物, 所以在某些情况下, 公司需要自行测量一些前沿材料的阻抗。Parler 曾在设计一款大型铝电解电容器时, 需要对具有复杂微结构的氧化铝( $Al_2O_3$ )电介质的阻抗进行表征。这类电介质是由高度蚀刻的曲折铝箔表面经过阳极化处理后制成的(图 3)。

虽然使用另一款软件来执行零维电路仿真也能再现频率响应, 但是由于其内置的拉普拉斯逆变换算法带有局限性, 并会引起“非因果性”错误, 因此

无法执行瞬态仿真。

利用 COMSOL 软件提供的形状优化技术, Parler 可以为顾客计算出正确的瞬态解。为了通过非线性优化方法找到最佳的几何形状, 他从一个电容孔隙填充有电解质的圆柱形电容孔隙开始模拟, 在开口处施加给定的激励, 并启用了软件中的稀疏非线性优化求解器(sparse nonlinear optimizer solver, 简称 SNOPT)。在求解过程中, 他需要不断调整轴对称孔壁的形状, 直到模型的计算结果与通过实验得到的阻抗数据能够吻合。

图 4 中显示了最终生成的几何图形, 研究人员便能够基于经过验证的数学模型, 开展下一步的设计工作。

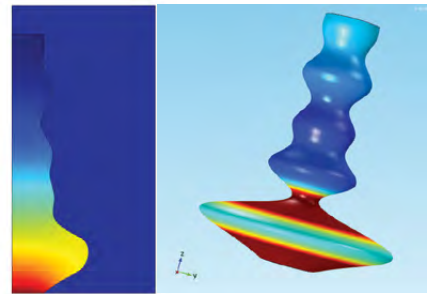


图 4. 针对由介电材料构成的同轴微结构而言, 形状优化技术是获取其电气特性的有效方法之一。上图显示了优化后的微结构。

研究人员便能够基于经过验证的数学模型, 开展下一步的设计工作。

“通过使用 COMSOL Multiphysics 及其‘App 开发器’工具, 我们可以建立高精度的多物理场模型, 并基于模型开发仿真 App。这一方式让其他部门的同事能够对不同配置进行自由地测试, 从而选定最优设计。”

— SAM PARLER, CDE 公司研发主管

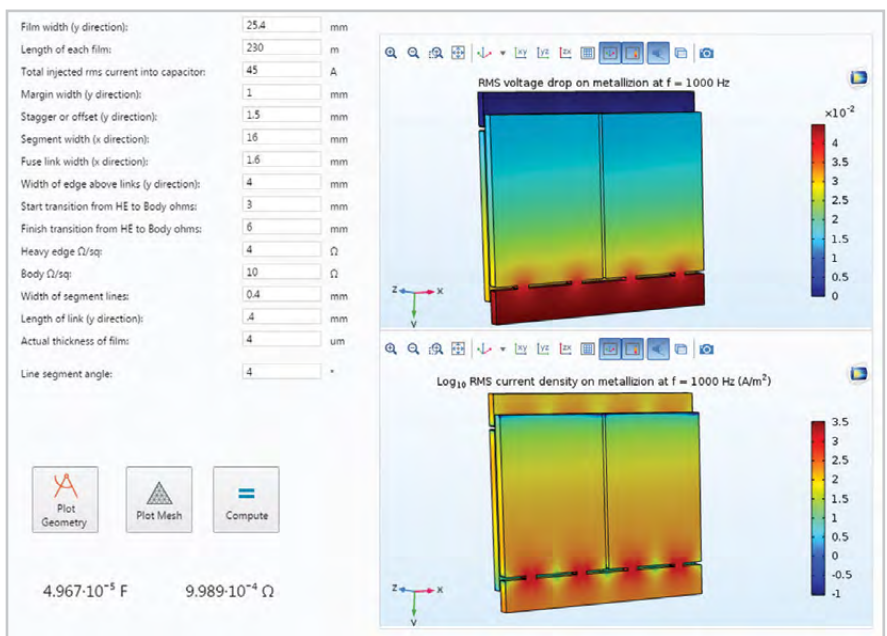


图 5. 用于计算功率薄膜电容器的电容和电阻的设计 App。



## ⇒ 用于电气优化的案例库

在使用 COMSOL 软件创建了用于分析设计方案的模型后，Parler 和团队成员将模型封装成了仿真 App。封装后的仿真 App 能够被自由地部署和分发给设计人员和生产部门，用于协助他们完成设计工作。

在使用仿真 App 进行功率薄膜电容器设计时，设计人员可以在仿真 App 的用户界面中输入相关参数，包括薄膜宽度（通常为几厘米）、薄膜长度、表面电阻和过渡区位置等，进而计算出一段金属薄膜的电容和电阻（图 5）。将仿真结果按比例放大，就能得到整段绕组的电容和电阻数据，从而帮助工程师完成对设计的初步验证。

另一个 App 适用于计算圆柱形电容器中金属薄膜的功率密度，并可对包括接头和端子在内的芯子温度分布进行预测。仿真 App 还分析了纹波电流、环境温度和气流速度等客户需要的工作条件（图 6）。

第三个 App 的作用是计算单接头薄膜电容器的等效串联电感 (effective series inductance, 简称 ESL)（图 7）。使用者可以自由地修改端子的直径、高度、间距、接头宽度、绕组直径和芯子外径等几何参数。底层模型利用了 COMSOL 软件中的频域研究和电磁建模功能。ESL 是各类电容器设计的关键参数，它会直接影响电容器的性能。

## ⇒ 仿真 App 引领制造业的未来

在多物理场仿真的帮助下，Parler 的团队能够准确预测电容器设计的性能，这帮助他们大幅提升了研发效率，同时还确保了产品的可靠性。

借助基于 COMSOL 模型开发出的仿真 App，生产现场的设计人员和工程师可以在简洁的用户界面中调整关键参数，测

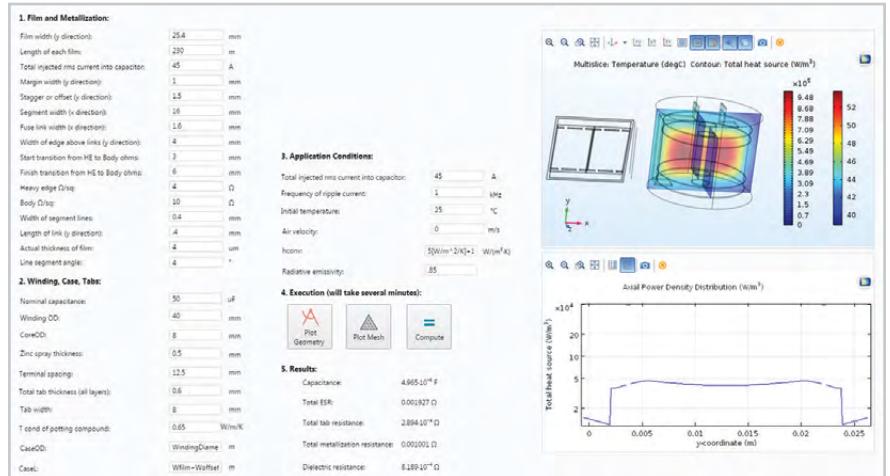


图 6. 此仿真 App 可用于预测带接头和端子的圆柱形电容器内芯子的温度分布和薄膜的功率密度。

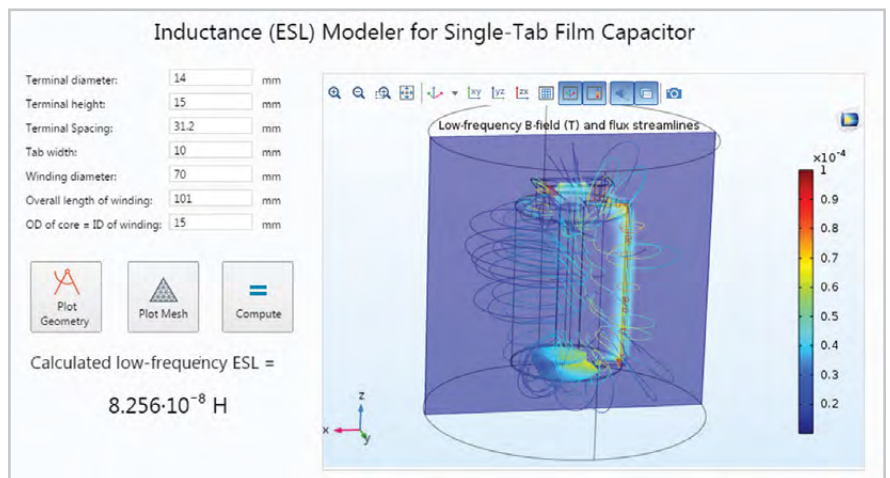
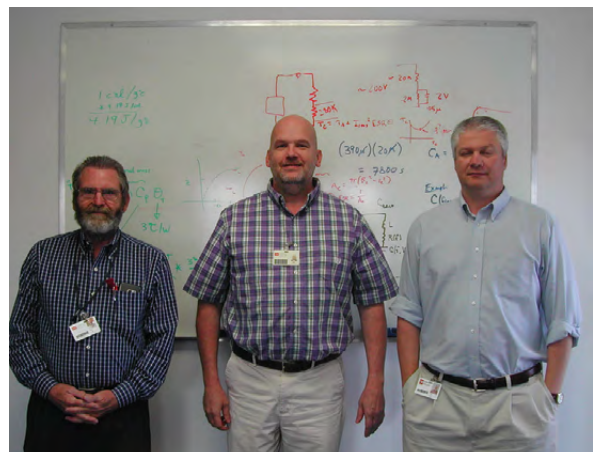


图 7. 此仿真 App 可用于计算单接头薄膜电容器的等效串联电感。

试电容器的性能和不同参数对电容器的影响。这种方式将仿真的强大力量延伸到了整个设计和生产过程。

Parler 总结道：“多物理场模型和仿真 App 的存在大幅简化了电容器的设计流程，帮助我们为全世界的客户更快地开发出性能更优的定制化电容器。”



CDE 公司的员工，从左至右依次为：研究员 David Leigh、研发主管 Sam Parler、电容器工程师 Trent Bates。