

COMSOL 工程应用系列手册

多物理场仿真

在电子设备热管理中的应用

目 录

简介	3
工程目标	4
电子设备的热管理	4
传热的应用领域	4
传热机理	5
数值仿真	6
电子设计中的数值仿真	6
传热建模的物理场接口	7
单物理场接口	8
多物理场接口	9
扩展接口	10
建模案例	10
平板上方的非等温湍流	10
圆管中的非等温层流	11
一种热光型硅光子开关的优化	11
平板热管的传热与流体动力学	12
大型强子对撞机中的超导磁体	12
植入式医疗设备的温度适应性	13
仿真 App 案例	14
使用仿真 App 进行传热与流体动力学教学	14
使用仿真 App 模拟定制化电容器	15
使用仿真 App 比较石墨箔传热性能	16
结语	17
参考文献	18
更多资源	19

简介

通常,在设计电子设备时,需要充分考虑热管理因素。随着设备性能的提升和市场竞争的加剧,为了实现可靠性更高、能耗和成本更低、安全性更强以及用户体验更好的设计目标,越来越多的研究人员开始使用数值仿真技术进行设计工作。

本手册介绍的仿真案例涉及多种系统,这些系统各不相同,但均有电流存在。在这些案例以及大多数工程应用案例中,对系统中引起温度变化的传热机制和因素进行研究,可以帮助工程师更好地理解设计对产品性能产生的影响。

本手册还介绍了 COMSOL Multiphysics® 软件及其附加产品在分析设备传热和多物理场行为方面的功能与特点,以及在研究案例的过程中如何充分利用这些功能与特

点;并讨论了如何使用物理场接口、多物理场耦合和后处理功能来研究对流冷却、焦耳热、相变和热膨胀等现象。

除能够进行物理场建模外,COMSOL® 软件将多物理场模型封装成仿真 App 的功能也非常值得关注。这项功能使研究人员能够更加轻松地开展数值仿真工作。图 1 为一个仿真 App 的界面,利用该仿真 App,仿真专家可以直接将仿真结果分享给合作者或客户使用。这样既能够保护企业的知识产权,也不需要使用者了解 COMSOL 软件的操作。

本手册仅列出了部分应用案例。事实上,COMSOL 多物理场仿真软件可以满足各种各样的应用和设计需求,并且可以对任意数量的多物理场耦合现象进行研究。

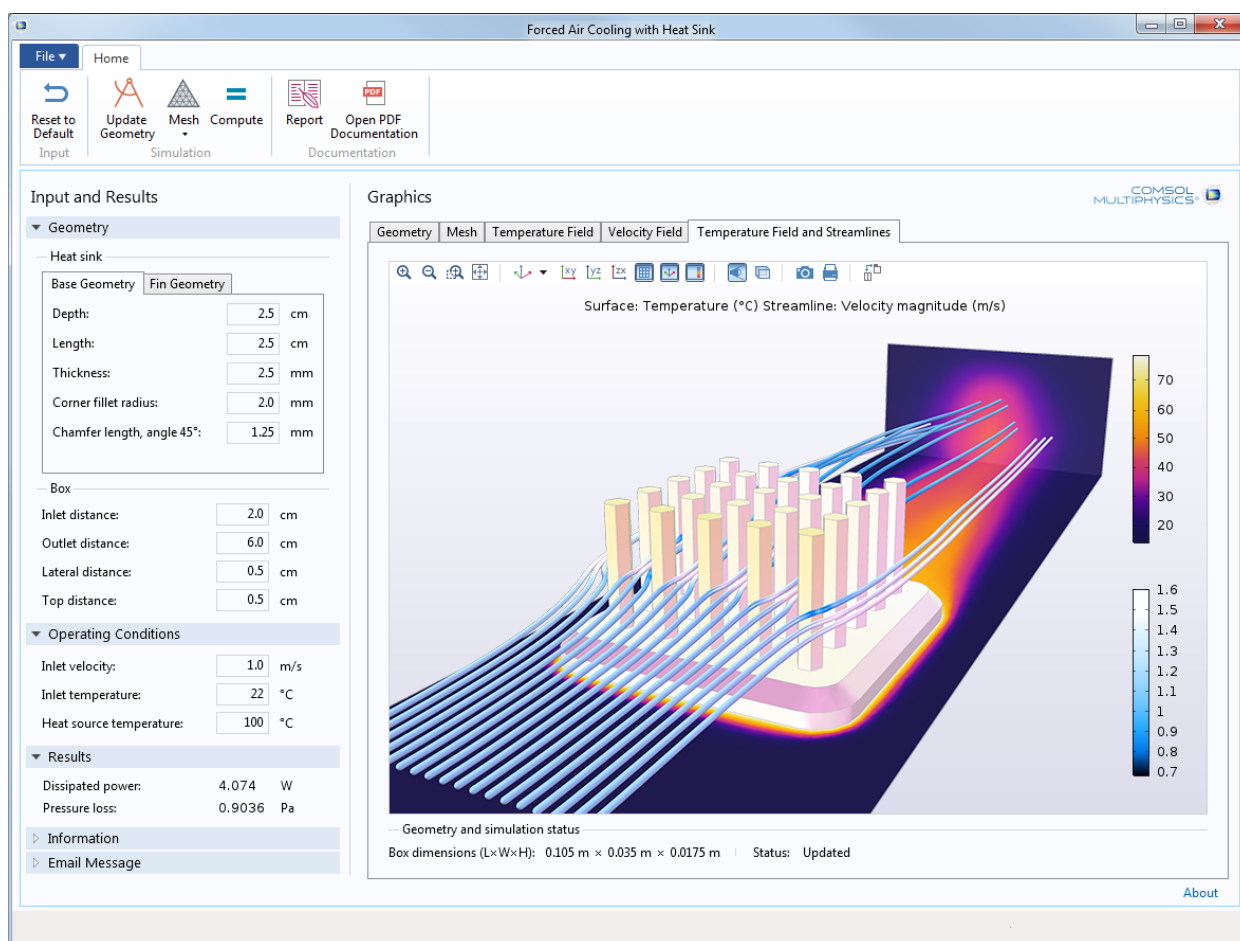


图 1 对散热器进行仿真,使研究人员能够计算出散热情况和压力损失。在图示的仿真 App 中,使用者不仅可以调整散热器中的气流速度和热源特性,还可以更改翅片数量和类型。获取此仿真 App 的更多信息,请参阅 cn.comsol.com 网站“案例下载”页面中的散热器模型。

工程目标

电子设备的热管理

设备热管理的工程目标主要包括效率、安全性、可靠性、用户体验和成本等方面。此外, 在各类电子设备的设计过程中, 材料的特性、保持适当的电流水平以及避免热疲劳, 也是需要考虑的内容。

以往, 电子设备的设计主要依靠实验经验 (见参考文献 R1), 然而实验成本通常非常高昂, 并且实验过程比较耗时。现在, 数值仿真技术为设计工程师的工作提供了很大帮助。COMSOL Multiphysics 软件可以准确地耦合多个物理场 (如流体流动、热量传递和力学特性), 精确地表征多种物理场现象, 从而支持研究人员开展电子设备的热管理研究。

COMSOL 软件自带多个物理场接口, 可用于各类设备热行为的研究工作。研究人员既可以单独使用 COMSOL 软件中的传热模块, 也可将其与 AC/DC 模块联合使用, 用于评估电流对热管理的影响; 还可以将传热模块与 CFD 模块或管道流模块相互耦合, 分析流体流动及传热情况。

欧洲核子研究中心 (Conseil Européenn Pour la Recherche Nucléaire, CERN) 的大型强子对撞机在运行时, 其中的磁体温度需冷却至极低才能维持在超导状态, 但在实际运行中磁体线圈可能会恢复到有电阻的状态, 即“失超”状态。为了理解和预测“失超”状态, 研究人员利用数值仿真, 对“失超”时磁体的电动力学和热演化情况进行了多物理场、多尺度和多重速率表征 (见参考文献 R2)。图 2 为在“失超”状态下, CERN 大型强子对撞机的超导磁体线圈的温度分布仿真结果。

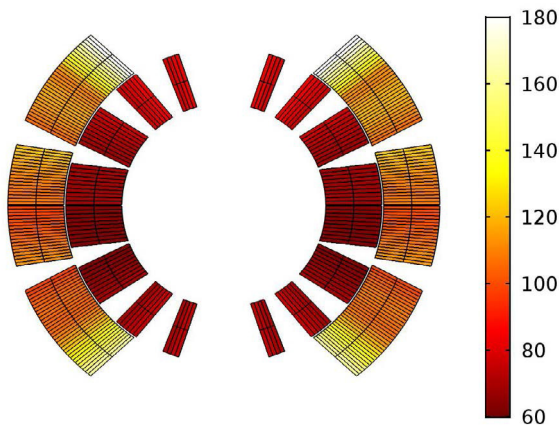


图 2 大型强子对撞机中的超导线圈在“失超” 500 ms 后的温度分布 (K)。

传热的应用领域

传热通常与其他物理现象同时出现, 或作为其他物理现象的结果出现。为了准确地模拟这些情况, 模型中需要考虑物理现象间的耦合效应和温度对材料性能的影响。例如, 温度变化引起变形的情况普遍存在, 这种变形会导致电线、接头和连接器等关键的小零件发生弯曲或断裂。因此, 在进行结构分析时必须考虑热应力。

许多应用都需要考虑热负荷这一因素, 如零件设计、温度控制方法以及制造工艺等。例如, 在考虑小型消费类产品的散热、控制高灵敏度机械的热校准或提高光伏电池的转换效率时, 评估热负荷带来的影响是非常有必要的。

我们来看一个 Cornell Dubilier 公司的案例。该公司的工程师 (见参考文献 R3) 通过仿真分析, 设计了一组定制化电容器电热性能测试方案, 并根据电容器的用途挑选出了最佳设计方案 (图 3)。

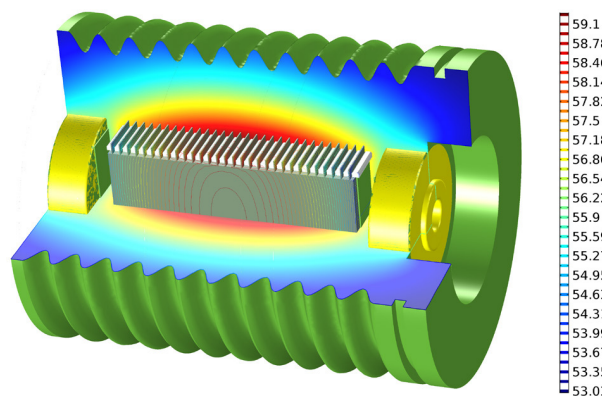


图 3 在 12 kHz、20 kVrms 下运行的高压无电晕云母电容器 (CDE 297 型) 的内部温度分布。

根据设计方案中电容器的几何结构和材料特性, 工程师可以深入理解电容器各个部件的散热效率及其运行的最高温度, 从而判断零件在其设计寿命内是否能够经受热负荷的考验。如果不能, 是否必须实施降温, 或对已有的降温方式进行调整。实现降温的方式有以下几种: 在设备表面添加一路气流, 或嵌入降温或加热通道, 或引入热管等。对于小型消费类电子设备, 通常会采用散热器和风扇进行降温; 而对于大型电子和机电系统, 则更常采用热泵和热电冷却器。

另一个传热的应用案例为美国 FZB 公司的工程师在设计汽车动力转向装置时,发现电气控制单元 (Electrical Control Unit, ECU) 中线束的热负荷会对整车性能产生显著影响。他们利用多物理场仿真研究了整个 ECU 结构中的传热特性 (见参考文献 R4)。

图 4 的仿真结果显示了整个 ECU 和转子总成的温度分布。为了避免出现过热的问题, FZB 的工程师利用数值分析来确认设计方案以及零件的选择是否可行,并给出了必要的修改建议;仿真模型还可以用来预测 ECU 被安装到汽车上运行时系统的热性能。

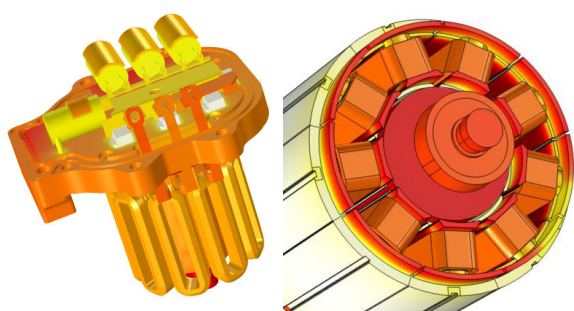


图 4 动力转向装置 ECU 线束和转子总成 (左),以及定子和转子总成 (右) 的温度剖面。图片来源: FZB 公司。

传热机理

在设计电子设备时,通常需要考虑多种传热过程,以及每种传热过程是如何影响设备性能的。例如,焦耳热效应会产生热量,从而导致温度升高。为避免零件发生故障,必须对其进行检测和控制。本节将简要地介绍传热机理,它是 COMSOL Multiphysics® 软件中对传热问题进行建模和仿真的基础。

热传导和对流通常是影响整个过程或设备传热的主要因素。热传导是通过电动机和电线等固体部件进行的,而对流则是通过流动介质 (如热源周围开放空间中流动的空气) 进行的。对流通常是利用风扇来推动空气流动,而散热器则利用对流将热量转移出热敏区域。

图 5 显示了传热的三种不同机理: 传导、强制对流和辐射。通常,用 q' (W) 表示传递的总热流量,热通量 q'' (W/m²) 由计算热传递的速率方程定义,为垂直于传热方向的平面或表面上单位面积的传热速率。

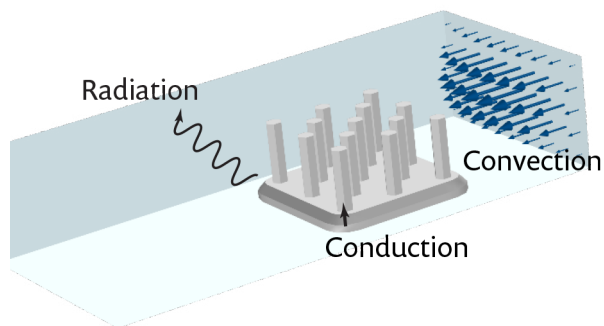


图 5 传导、强制对流和辐射有助于散热器和周围空气之间的传热。图注: Conduction - 传导; Convection - 对流; Radiation - 辐射。

传导的本质是通过电子运动和分子振动来传递能量。当静止的固体或流体介质中存在温度梯度时,会发生热传导。根据傅立叶定律,热通量可由温度梯度乘以导热系数 k [W/(m·K)] 得出,即

$$q'' = -k\nabla T$$

对流则是由流体运动引起的,当流体整体流动时或进行宏观运动时能量会发生转移。如果是由外部因素导致的流体流动,称为强制对流;如果是由内部浮力引起的流动,则称为自然对流。此时,速率方程可由牛顿冷却定律给出,作为对流问题的边界条件。热通量可表示为:

$$q'' = -h(T_s - T_\infty)$$

式中, T_s (K) 为物体表面温度, T_∞ (K) 为周围流体温度, h [W/(m²·K)] 为对流传热系数。

传热的第三种机制为辐射。辐射发生在温度不同的不透明表面之间,有无中间介质均可发生。此时,热通量 (表面热辐射) 可表示为物体向外辐射的能量与接收的辐射能量之差:

$$q'' = -(\epsilon\sigma T_s^4 - \alpha G)$$

式中, ϵ (无量纲) 为辐射系数, σ [W/(m²·K⁴)] 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数, T_s (K) 为物体表面温度, α (无量纲) 为吸收率, G (W/m²) 为物体受到的辐射。

以上三种传热模式可以同时存在,大多数热管理问题都应对这三种模式加以考虑。图 6 显示了在散热器的仿真模型中,每种传热机制的热通量在总热通量中所占的比例。

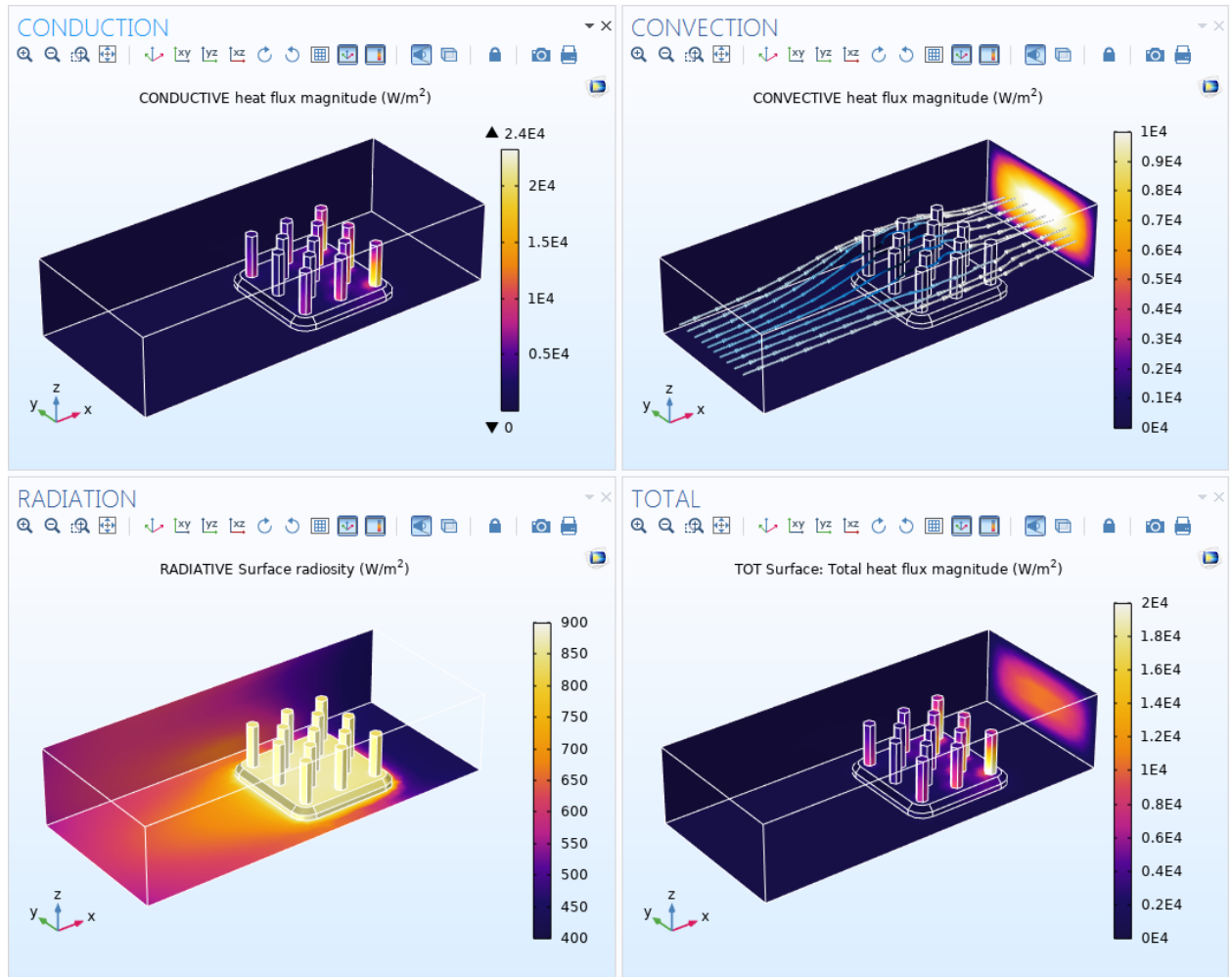


图6 传导热通量（左上）、表面热辐射（左下）、对流热通量（右上）以及到散热器的总热通量（右下）。

图注: CONDUCTIVE heat flux magnitude - 传导热通量; RADIATIVE Surface radiosity - 表面热辐射; CONVECTIVE heat flux magnitude - 对流热通量; TOT Surface: Total heat flux magnitude - 总热通量。

数值仿真

电子设计中的数值仿真

多物理场仿真软件已成为电子设备设计中广泛使用的工具。如今,通过开发相应的多物理场模型,可以显著降低产品设计的成本和时间,极大地缩短了高科技产品的上市时间。例如,德国奥尔登堡大学 NEXT ENERGY EWE 能源技术研究中心在研发高端电池系统制造工艺时,就使用了多物理场仿真技术(见参考文献 R5)。

在加工过程中,高温可能会导致锂离子电池功能退化。因此,在设计时必须遵循严格的标准,以确保在预期温度波动范围内,电池的性能不受影响。

焊接等制造工艺会使电池内部的温度大幅上升。以前,研究人员并不了解这种高温在电池内部的传播以及对电池的危害程度,因此,该中心的研究人员研究了焊接高温是否能在电池内产生足够高的温度,以及电池是否会出现不可逆损伤(如,电解质分解和容量降低)。

首先, 研究人员通过实验采集了方形锂电池在短期热压力下的数据, 用来验证数学模型的正确性; 之后, 再利用 Autodesk® Inventor® 软件创建了一个商用方形锂电池的三维模型, 并将其导入 COMSOL Multiphysics® 软件中。

研究人员选用了多种由不同工艺制造的电池进行建模, 并将外部热源置于电池的不同位置, 模拟了各种情形下的传导传热, 以及电池表面其他区域的自然对流散热的情况。数值仿真结果显示了对锂离子电池的外壳表面施加 50 W 热压 60 s 后, 电池内部温度的分布情况 (图 7, 上); 以及对锂离子电池进行 1100 °C 极耳焊接后, 温度的传播情况 (图 7, 下)。

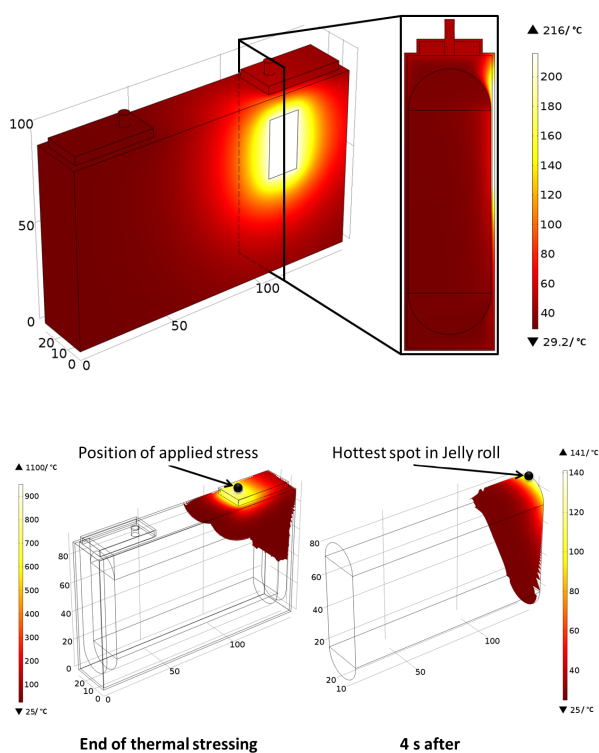


图 7 数值结果显示了锂离子电池内部的最热点 (上) 和电池内部温度随时间变化的传播情况 (下)。模型图由 G.Liebig 和 L.Komisyska 制作, NEXT ENERGY EWE 能源技术研究中心。

图注: Position of applied stress - 热压施点; Hottest spot in Jelly roll - 卷芯最高温度点; End of thermal stressing - 焊接结束; 4s after - 4s 后。

传热建模的物理场接口

COMSOL Multiphysics® 软件可以模拟电子设计中的传热现象。软件中的传热模块可对传导、对流及辐射三种传热机理进行建模。为了提高热管理仿真的准确性, 还可以结合速度、压力、湿度或电磁对温度场进行建模。图 8 列出了使用 COMSOL 软件中的传热模块 (无其他附加产品) 建模时, 可用的物理场接口列表。

这些物理场接口可用来仿真各类一维、二维和三维器件的瞬态和稳态过程, 以及各种可用柱坐标系表示的具有轴对称结构的一维或二维部件。图 9 为阿尔卡特朗讯的贝尔实验室 (Bell Labs Alcatel-Lucent) (见参考文献 R6) 使用固体传热和电流两个物理场接口开发的微型热电冷却器 (μ TEC) 模型。

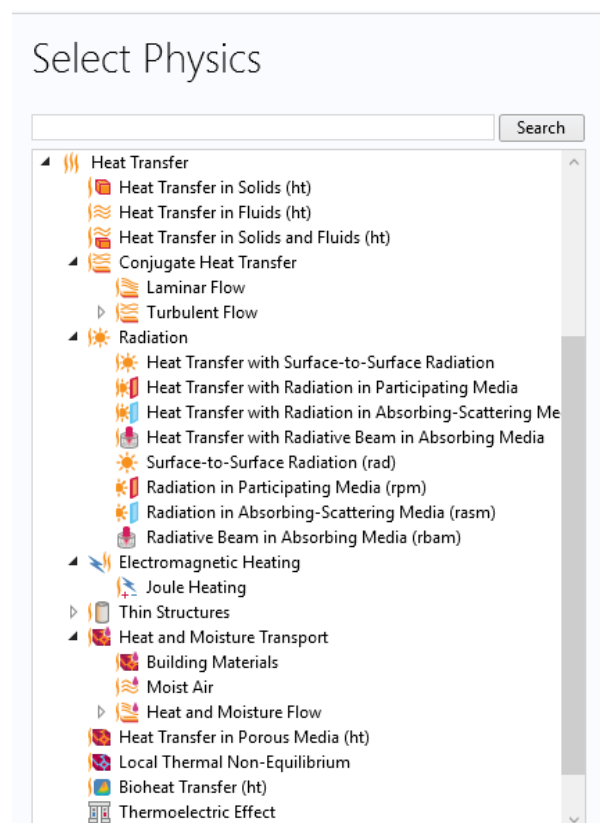


图 8 COMSOL® 软件传热模块中的物理场接口。

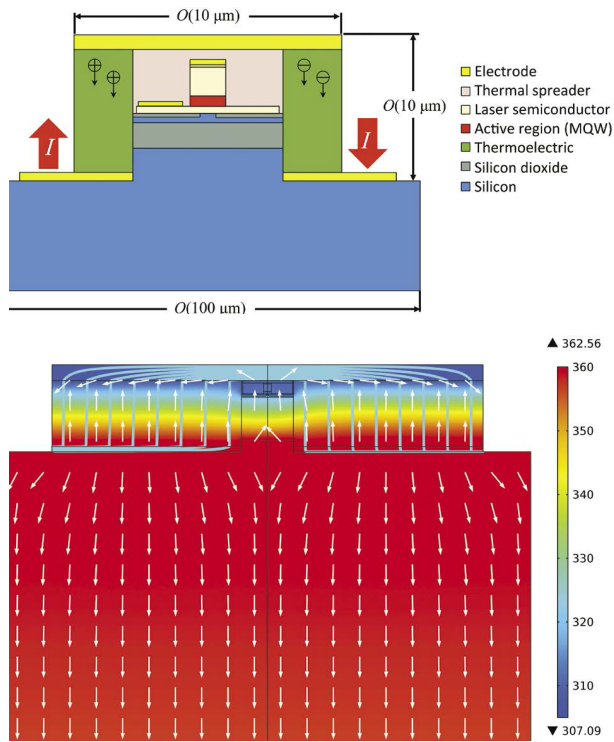


图 9 集成了 μ TEC 的通信激光器结构 (上)。仿真结果显示了激光器中的温度 (表面图)、电流密度 (流线) 和热通量 (箭头) (下)。阿尔卡特朗讯贝尔实验室供图。

图注: Electrode - 电极; Thermal spreader - 均热器; Laser semiconductor - 半导体激光器; Active region (MQW) - 活性区 (多量子阱); Thermoelectric - 热电偶; Silicon dioxide - 二氧化硅; Silicon - 硅。

COMSOL Multiphysics® 软件中的材料库收录了 2 650 种材料的特性和数据, 包括隔热材料、半导体和压电材料等多种类型。相关的传热接口中还配备了标准气象数据, 可精确模拟室外条件, 或用于变压器、通信电缆以及工作在海底或沙漠环境下的设备的建模。这些数据来自全球各地 8 000 多个气象站, 其中包括气温、相对湿度、绝对压力和风速的年变化和月变化数据。

单物理场接口

固体和流体中的传热

可用于模拟固体和液体中的传导、对流和设备表面对环境的辐射三种传热方式。

表面对表面辐射

可建立漫反射面、漫反射及镜面反射组合面, 以及半透明层上表面对表面辐射的模型。主要用于模拟相互辐射和外部辐射源 (如太阳)。

参与介质中的辐射

可用于模拟半透明介质中辐射的发射、吸收和散射。

吸收-散射性介质中的辐射

可用于模拟非发射半透明介质中辐射的吸收和散射。

吸收介质中的辐射束

可用于模拟由吸收辐射束引起的衰减, 如在非发射、非散射介质中的激光。

壳、薄膜和裂隙中的传热

主要用于模拟固体和液体类薄膜结构中的传热, 包括传导、对流以及表面对环境辐射。

生物传热

专门用于模拟生物组织中的传导、对流和辐射传热。

多物理场接口

共轭传热

耦合了传热和单相流两个物理场接口，用于模拟固体和流体中的传热，包含层流和湍流。

表面对表面辐射传热

耦合了传热和表面对表面辐射两个物理场接口，用于模拟传导传热、对流传热以及表面对表面的辐射传热。

参与介质中的辐射传热

耦合了传热和参与介质中的辐射两个物理场接口，用于模拟半透明介质中的传导传热、对流传热以及辐射传热。

吸收-散射性介质中的辐射传热

耦合了传热和吸收-散射性介质中的辐射两个物理场接口，用于模拟非发射半透明介质中的传导传热、对流传热以及辐射传热。

吸收介质中的辐射束传热

耦合了传热和吸收介质中的辐射束两个物理场接口，用于模拟吸收介质中的传导传热、对流传热以及辐射传热。

焦耳热

耦合了传热和电流两个物理场接口，用于模拟电阻加热，包括材料特性随温度变化的情况。借助附加产品，还可以对感应加热和微波加热的效果进行分析。

建筑材料和湿空气

耦合了传热和水分输送两个物理场接口，用于模拟建筑材料或空气中的水热耦合和水汽输送，进而解释潜热效应、热量和水汽储存和运输。

热湿流动

耦合了单相流、传热和水汽输送物理场接口，用于模拟水热耦合和水汽输送的过程。

局部热非平衡

耦合了两个传热物理场接口，在固体和流体系统不平衡的情况下，对多孔介质中的传热进行仿真，用来研究孔内流-固界面的传热。

热电效应

耦合了传热和电流两个物理场接口，用于模拟珀尔贴-塞贝克-汤姆逊效应 (Peltier-Seebeck-Thomson effects)。

为了理解系统的物理过程，对仿真结果进行分析是非常有必要的。而这一工作离不开 COMSOL® 软件中后处理和可视化工具的帮助。软件中强大的图形工具可将多种多样的抽象物理现象处理为直观可见的内容，如温度的分布、热通量、结构应力、流体流动或电流变化等。对热管理而言，图形工具非常有用。例如，在电缆设计中，必须考虑电缆零部件中的电容、电感和热效应，以控制电流积聚和损耗。图 10 所示的电缆模型中，用到了固体传热接口，以及 AC/DC 模块中的磁场接口。在对海底电缆模型中的热剖面 and 磁场进行描述时，还利用了 COMSOL 软件的后处理功能。更多细节请参阅 COMSOL 网站“案例下载”页面中的电缆系列教程。

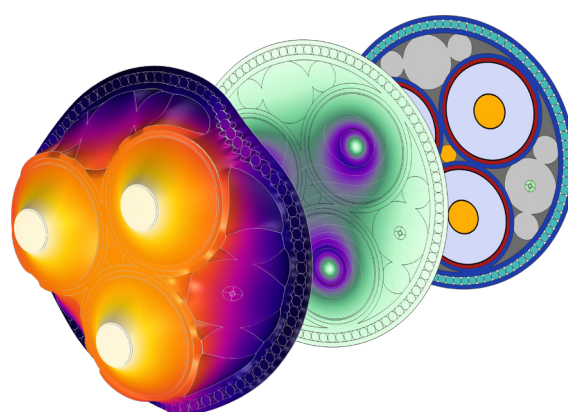


图 10 工业级电缆横截面 (右) 中的磁感应强度 (中) 和温度 (左) 分布图。

研究人员可以将整个仿真过程生成绘图,也可以选定一段特定时间范围或特定阶段来生成绘图。这使得仿真过程更加灵活、高效,也能使仿真结果的呈现方式更易控制。同时,研究人员也可以在计算区域中设置一些探测点,方便在仿真过程中监测某些数值的变化。

COMSOL Multiphysics® 软件还具备与其他软件对接的能力,使仿真工作更加灵活。研究人员可以利用 COMSOL 软件中的 LiveLink™ 产品,将另一个软件中的几何模型同步到 COMSOL 软件中。图 11 展示了一个将电子设备机箱模型同步到 COMSOL 软件中的案例。有关该模型的更多细节,请参阅 COMSOL 网站“案例下载”页面中的“含风扇和格栅的封闭空间的强制对流散热”模型。

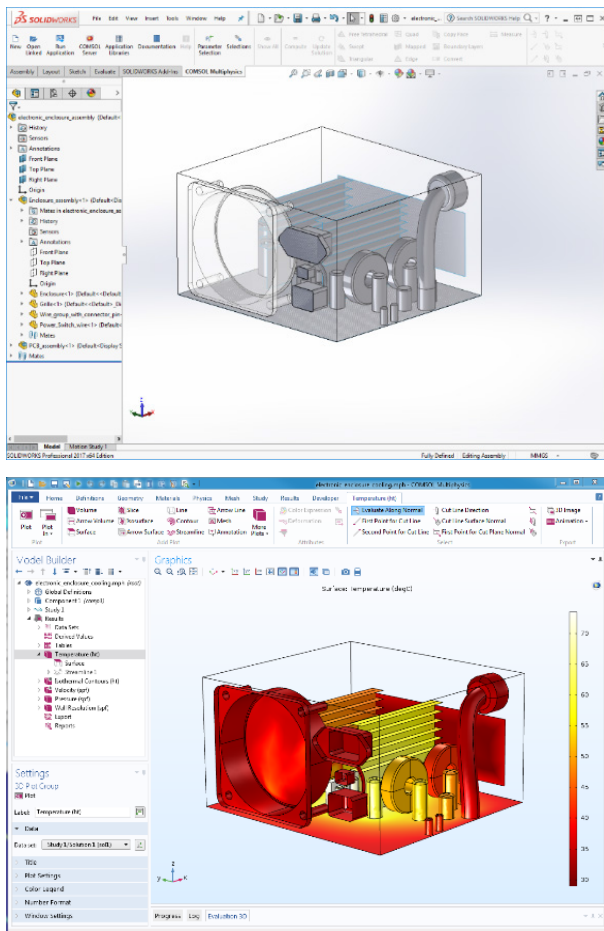


图 11 通过 LiveLink™ for SOLIDWORKS® 扩展接口,实现电子设备机箱的 CAD 设计结构与 COMSOL® 模型的双向同步。

扩展接口

CAD 导入模块

允许导入支持主要的 CAD 软件包和各种本机文件格式。

ECAD 导入模块

可将 GDSII、ODB++¹⁾ 和 NETEX-G 等格式的 ECAD 文件导入 COMSOL Multiphysics®。

LIVELINK™ for MATLAB®

允许 COMSOL Multiphysics®、MATLAB® 和 Simulink® 软件之间互相导入模型。

LIVELINK™ 产品

允许 COMSOL Multiphysics® 和 CAD 软件(如 SOLIDWORKS®、Creo® Parametric™ 和 Inventor® 等)²⁾ 之间双向同步模型的几何结构。

建模案例

COMSOL 网站“案例下载”页面提供了各类工程领域中的仿真案例,范围覆盖传热、流体流动和电磁等不同领域。所有案例均提供了完整的分步教程和仿真 App 演示文件,它们是开展建模工作的起点。本节的前两个案例是基于两个常用的基准模型构建的,它们验证了 COMSOL Multiphysics 仿真的准确性。

1) Mentor Graphics 公司根据《ODB++ 解决方案开发伙伴关系一般条款和条件》(<http://www.odb-sa.com>) 实现 ODB++ 格式。

2) Autodesk、Autodesk 徽标以及 Inventor 是 Autodesk, Inc. 公司和/或其子公司和/或关联公司在美国和/或其他国家/地区的注册商标或商标。MATLAB 和 Simulink 是 The MathWorks, Inc. 公司的注册商标。SOLIDWORKS 是 Dassault Systèmes SolidWorks Corp. 公司的注册商标。Creo 和 Parametric 是 PTC Inc. 公司或其子公司在美国和其他国家/地区的商标或注册商标。

平板上方的非等温湍流

平板上方的非等温湍流模型是 COMSOL Multiphysics® 软件案例库中提供的一个验证模型, 模型中描述的物理原理可作为许多冷却器件的建模基础。模型将通过共轭传热仿真得到的传热系数与文献中基于努塞尔数得到的理论值进行了比较验证 (见参考文献 R1)。图 12 为数值仿真结果与理论值的比较。可以看出, 在平板模型中两种数值吻合地非常好。更多详细内容, 请参阅 COMSOL 网站“案例下载”页面中的“平板上方的非等温湍流”模型。

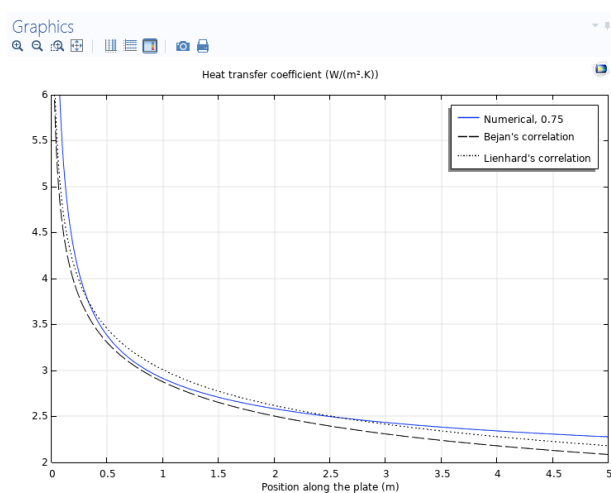


图 12 由数值计算得到的传热系数 (实线) 与基于努塞尔数估算的传热系数的比较。

图注: Heat transfer coefficient - 传热系数; Numerical 0.75 - 数值结果; Bejan's correlation - Bejan 关系式; Lienhard's correlation - Lienhard 关系式; Position along the plate - 平板上的位置。

圆管中的非等温层流

与许多应用案例相关的另一个物理描述是圆管中的非等温层流模型。同样, 模型通过对比基于实验确定的努塞尔数得到的传热系数和利用仿真得到的传热系数, 验证了仿真的准确性 (见参考文献 R1)。仿真结果显示了整个圆管内的速度场 (图 13, 左上) 和温度场 (图 13, 右上), 两种方式得出的数值几乎完全吻合 (图 13, 下)。更多详细内容, 请参阅 COMSOL 网站“案例下载”页面中的“圆管中的非等温层流”模型。

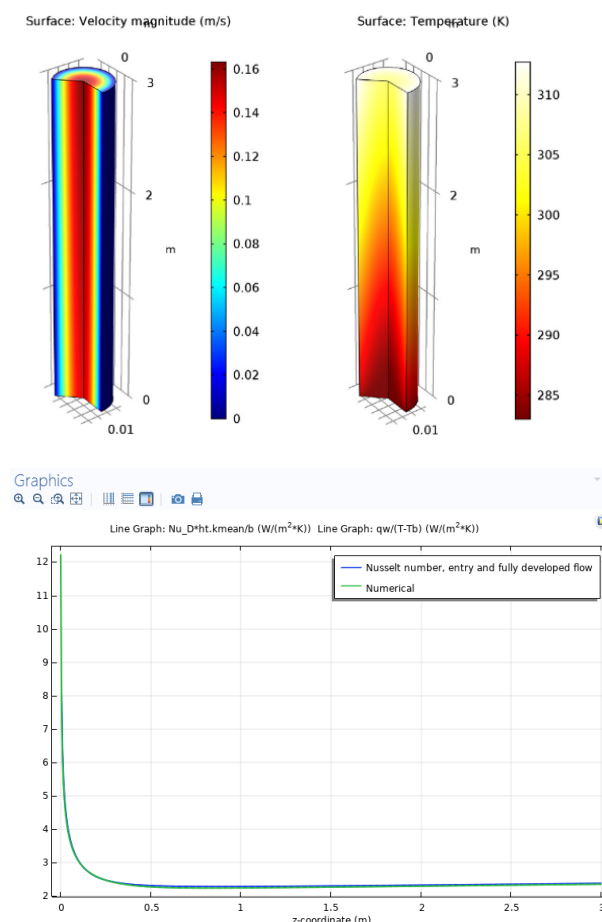


图 13 圆管中的非等温层流仿真结果。圆管中的速度场 (左上)、温度场 (右上) 和传热系数 (下)。

图注: Surface: Velocity magnitude - 表面: 速度大小; Surface: Temperature - 表面: 温度; Nusselt number, entry and fully developed flow - 努塞尔数, 充分发展的流动; Numerical - 数值结果; z-coordinate - z-坐标。

通过比较计算得出的传热系数与实验确定的努塞尔数可知, 局部努塞尔数能够很好地表示整个圆柱体的情况。如果一个区域的努塞尔数变化较小, 则表明该区域中速度和温度已趋于稳定。

一种热光型硅光子开关的优化

在电气开关矩阵中,光信号首先被转换成电信号进行路径选择,然后再被转换回光信号通过另一根光纤发送出去。而全光开关则不需要额外的电光转换步骤,因此应用前景良好。

华为技术加拿大公司(见参考文献 R7)的工程师利用数值仿真技术,优化了通信和高性能计算行业的热光型硅光子开关。他们的研究旨在最大限度地降低功耗并将转换速度提升到最高,以满足不断增长的数据快速传输的需求。

在设计中加入传热凹口可以提高设备的能效,但同时也会降低转换速度,并且制造过程还需要增加额外的步骤。因此,传热凹口仅适用于某些应用情况。借助于多物理场仿真,华为的工程师量化了各种热光型开关设计的性能,包括有传热凹口和无传热凹口两种情况,如图 14 所示。

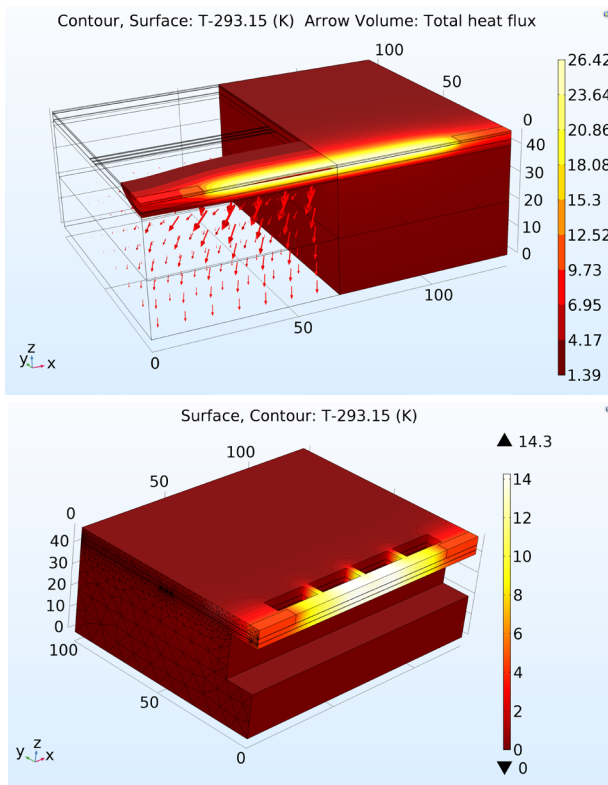


图 14 无传热凹口(上)和有传热凹口(下)的热光型开关模型。

平板热管的传热与流体动力学

热管的应用范围非常广泛,小到微电子系统,大到航天工业中的大型冷却装置,都有它们的存在。进行系统热管理,离不开热管的帮助。当与热侧接触时,热管内的液体吸收热量后汽化,之后蒸汽沿着热管流向冷侧,释放热量并再次变成液体。利用这种相变,冷侧和热侧之间可以实现非常有效的传热。热管的有效热导率可以达到铜的 250 倍。

图 15 所示的平板热管模型为一个带有均热板和内管芯的矩形结构铜热管。由于均热板两侧的蒸发器和冷凝器的饱和压力不同,因此板中的气体会发生流动,蒸汽流动时会释放潜热,从而产生热源端和冷源端。

示例中的模型研究了非等温层流,包括均热板内的对流传热和传导传热,以及蒸发和冷凝。仿真结果显示了均热板内的速度场和热管内的温度分布。更多详细内容,请参阅 COMSOL 网站“案例下载”页面中的“平板热管”模型。

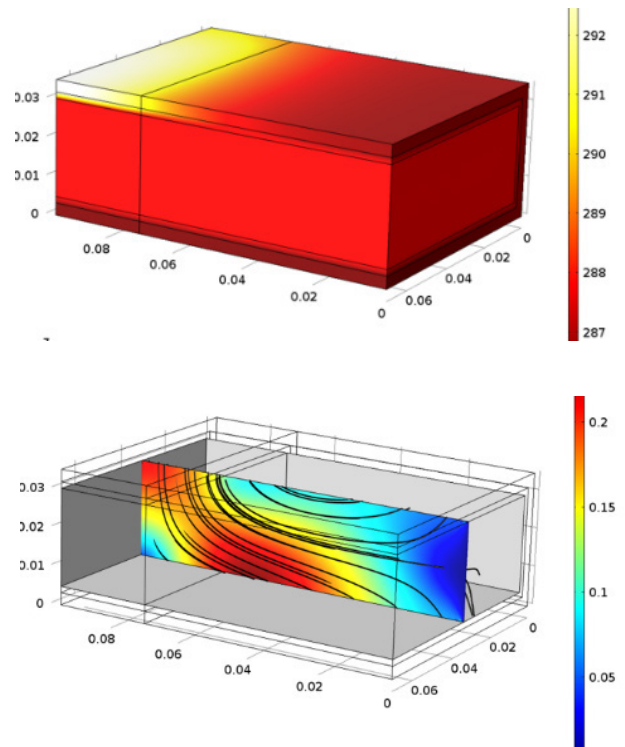


图 15 整个热管内的温度分布(上)和均热板的速度场(下)仿真结果。

大型强子对撞机中的超导磁体

大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 中的强场偶极子磁体用于保持粒子绕对撞机回转, 其工作电流高达 12 kA, 磁场可达 8.33 T。为将图 16 所示的磁体电缆维持在超导状态, 磁体温度需要被冷却到 1.9 K ($-271.25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 这比外太空的温度还要低。原则上, 超导状态下电流可以在磁线圈中不断循环, 不会产生电阻损耗。然而在实际运行中, 部分磁线圈有时会恢复到有电阻的状态, 即“失超”状态。

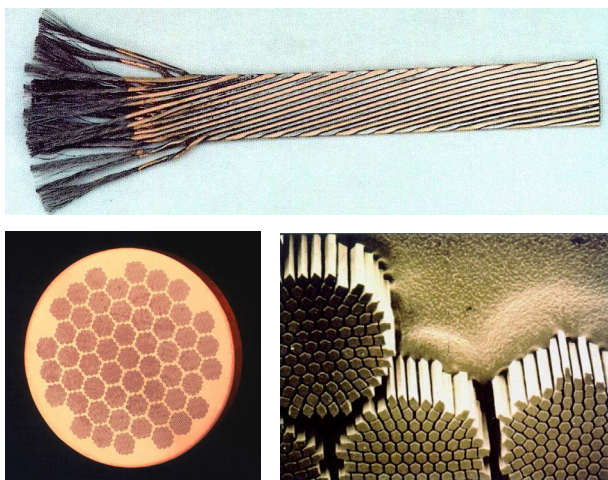


图 16 由超导微丝嵌入铜基体制成的电缆。大型强子对撞机中的强电流超导磁体即由这种电缆组成。

为了理解“失超”并阻止此类事件的发生, 欧洲核子研究中心的研究人员 (见参考文献 R2) 利用数值仿真技术, 对此类事件的电动力学和热量的演化过程进行了多物理场、多尺度和多重速率仿真。图 17 (左) 显示了大型强子对撞机主偶极的横截面, 其中红色和蓝色域表示使粒子始终保持圆形轨迹的超导线圈。灰色域表示铁轭。图 17 (右) 显示了发生 500 ms 的“失超”事件后磁体各部分的温度分布。

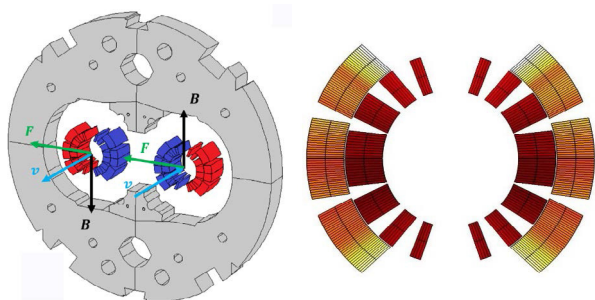


图 17 大型强子对撞机主偶极的横截面 (左); 发生 500ms “失超”事件后线圈中的温度分布 (K) (右)。

植入式医疗设备的温度适应性

创造一种能替代人体心脏来促使血液在人体内循环的装置并非易事, 而若要这种装置满足生物相容性则要求更高。在圣犹达医疗公司 (St. Jude Medical, 现雅培公司), 研究人员通过多物理场仿真模拟了左心室辅助装置 (Left Ventricular Assist Devices, LVADs), 来改善心力衰竭患者的生存前景和生活质量 (见参考文献 R8)。

Freddy Hansen 是该公司的高级研发工程师, 他创建了包含流体流动、电磁和传热等物理场的多个仿真模型, 来改善 LVAD 在人体内的生物相容性、血液相容性和免疫相容性。其中的一种模型可以对能量传输产生的热量进行分析, 并与经常引用的实验数据进行了比较, 以确保仿真的准确性 (图 18)。

除了利用软件中的 CFD 模块对整个心脏内的血流进行仿真外, 研究人员还利用其他模块对远程遥控器的耐久性进行了仿真。现在, 多物理场仿真已被证明是 LVAD 开发过程中不可或缺的组成部分。最新的研究成果为患者生活质量的提高带来了希望。

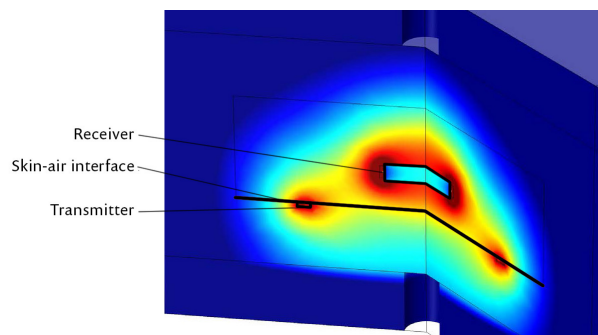


图 18 植入人体内医疗辅助设备的感应加热模型。仿真结果显示了组织和周围空气中的功率密度分布情况。

图注: Receiver - 接收器; Skin-air interface - 皮肤-空气界面; Transmitter - 发射器。

仿真 App 案例

COMSOL Multiphysics® 中提供的 App 开发器, 可基于多物理场模型创建仿真 App, 即用户可以不用了解如何建立仿真模型即可直接开展特定的仿真工作。

仿真 App 可将多物理场模型的强大功能分享给同事、合作者或客户。除仿真专家之外, 其他人也可以通过仿真 App 对某一问题的不同情况进行快速测试, 而无需对仿真有深入地了解。

用户也可以使用 COMSOL Compiler™ 将仿真 App 编译成独立的可执行文件。编译后的仿真 App 可以共享给任何地方的任何人, 使用者无需 COMSOL 许可证即可运行该仿真 App。如果要在整个组织中共享仿真 App, 可以将其上传至组织内部安装的 COMSOL Server™ 中, 通过网页界面管理和启动应用程序。

使用仿真 App 进行传热与流体动力学教学

创新往往需要打破原有模式, 课堂创新更是如此。在美国哈特福德大学, 机械工程学院的教授 Ivana Milanovic 博士在她的流体力学和传热课程教学中, 正在使用多物理场仿真和仿真 App 开展探究性学习 (见参考文献 R9)。

仿真 App 允许学生查看和控制指定的设置、输入和输出, 简洁的操作界面使他们无需成为专家或成为专家之前便能够使用软件强大的功能。此外, 仿真 App 的使用为哈特福德大学的工业赞助研究项目增加了价值, 同时也增加了学生对潜在雇主的吸引力, 因为在学校所在地康涅狄格州, 有许多航空航天以及制造业相关的公司都在使用仿真软件。

通常, 教科书只能展示静态的二维图像, 而仿真 App 可以提供系统的动态三维视图。例如, 由哈特福德大学一名学生创建的一款仿真 App (图 19), 可以模拟一杯冷水被加热到室温过程中的非等温流动。

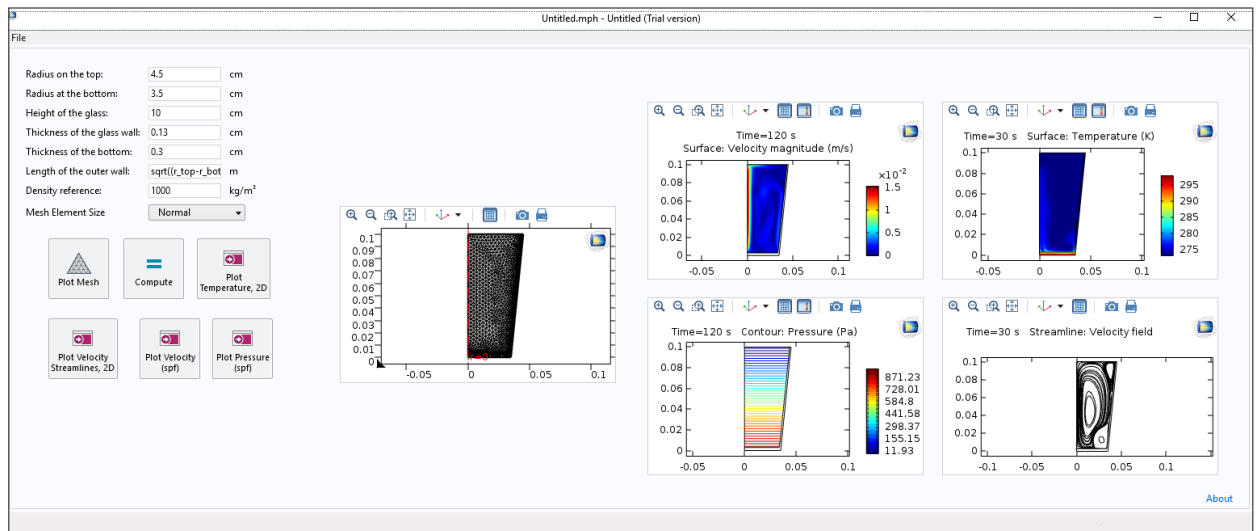


图 19 在由哈特福德大学一名学生创建的仿真 App 中, 用户可以研究一杯冷水被加热至室温过程中的非等温流动。仿真 App 可计算出玻璃杯中水的流速、温度和压力。

使用仿真 App 模拟定制化电容器

Cornell Dubilier 公司的工程师（见参考文献 R3）利用多物理场仿真模拟了一组定制化电解电容器（图 20），以确定电流通过卷绕的铝箔时产生的热量。



图 20 铝电解电容器由铝箔和具有热学各向异性的纤维素隔膜卷绕组成。

在优化电容器的发热和散热过程中，必须准确地描述电容器的组成材料。电流通过卷绕铝箔会产生焦耳热，而过多的热量会显著缩短电容器的寿命。当电容器的温度比最高允许温度高 6~10 °C 时，电容器的寿命就会缩短一半。一个电容器经常包含多达 6 种材料，其中一些材料具有各向异性的特性。

该公司的研究室主任 Sam Parler 对金属化聚丙烯薄膜电容器（图 21，上）和铝电解电容器（图 21，下）进行了模拟。在 45 °C 环境下，二者尺寸均约为 76 mm×120 mm，且都消耗了 5 W 的热量。通过模拟电容器的传热过程，他可以在原型制作之前预测设备性能，从而实现更加经济、高效的设计过程。

Sam Parler 发现，在团队内共享知识时，仿真 App 非常有用。在设计出多物理场模型后，Parler 和他的团队将模型封装为仿真 App，并准备分享给设计工程师和生产场地人员，以协助设计过程。

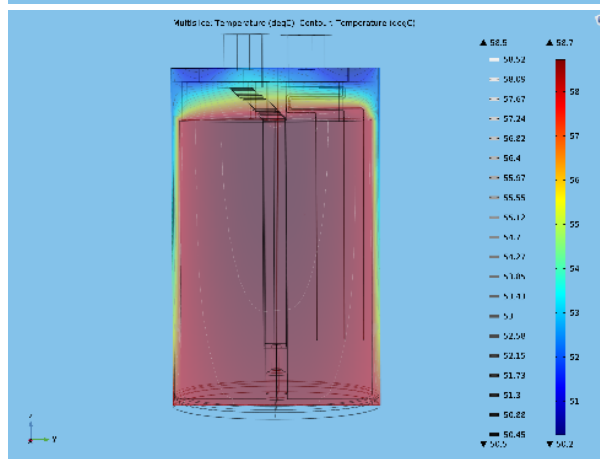
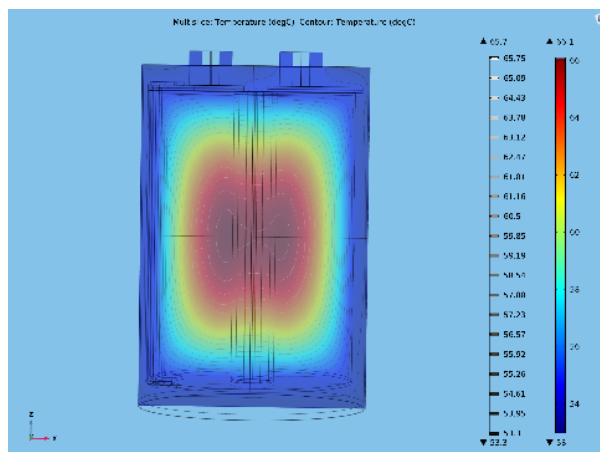


图 21 金属化聚丙烯薄膜电容器（上）和铝电解电容器（下）的温度场比较。

在一个关于功率薄膜电容器的仿真 App 中，设计工程师可以在仿真 App 界面设置薄膜宽度、薄膜长度、表面电阻和过渡区位置，以确定某段金属薄膜的电容和电阻（图 22）。

在另一个仿真 App 中，用户可以计算圆柱形电容器中金属薄膜的功率密度。该仿真 App 还可根据用户设置的工作条件（如脉动电流、环境温度和风速），预测电容器中心区域的温度分布，包括整个接线片和端子的温度（图 23）。研究人员还建立了一个用于计算单片薄膜电容器的等效串联电感的仿真 App（图 24）。

COMSOL Multiphysics® 具备的建立多物理场模型和仿真 App 的能力，简化了电容器的设计过程，并加快了为全球客户开发定制化电容器的速度。

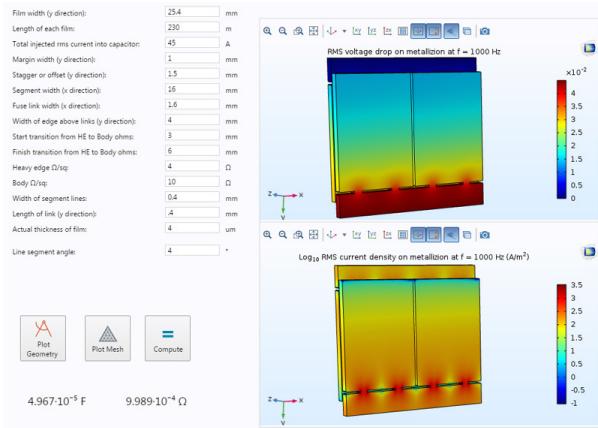


图 22 为确定功率薄膜电容器的电容和电阻而设计的一款仿真 App。

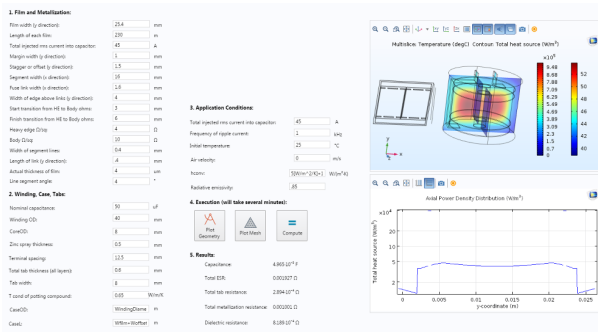


图 23 用于预测带接线片和端子的圆柱形薄膜电容器的核心温度分布和功率密度的仿真 App。

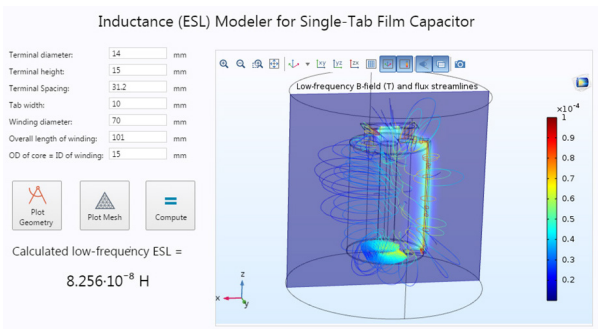


图 24 一款用于计算单片薄膜电容器等效串联电感的仿真 App。

使用仿真 App 比较石墨箔传热性能

作为石墨行业的领导者，GrafTech 公司正在使用仿真 App 改进其销售流程，以及在整个组织中共享知识。模拟石墨的正交各向异性是一项极具挑战性的工作，而将这一复杂因素直接忽略又是不可取的，因此利用 COMSOL Multiphysics® 软件进行高保真多物理场模拟，对于获取石墨设备中特有的传热方式非常有价值。

GrafTech 公司的销售总监 Pierre Hatte 发现了仿真 App 在销售方面的价值：公司的潜在客户可以利用仿真 App 比较不同结构的石墨设备的传热能力。这类似于客户在购买一套衣服前，可以先试穿，在确信能满足需求后再购买（见参考文献 R10）。

GrafTech 公司的仿真专家开发的一款名为“SpreaderCalc”的仿真 App（图 25），用来比较消费类电子产品中用于散热的石墨箔的传热性能。客户可以通过调整参数，准确了解参数变化将如何影响整个设备的传热。为此，他们在公司内部安装了 COMSOL Server™ 产品，使客户可以通过网页浏览器访问仿真 App。

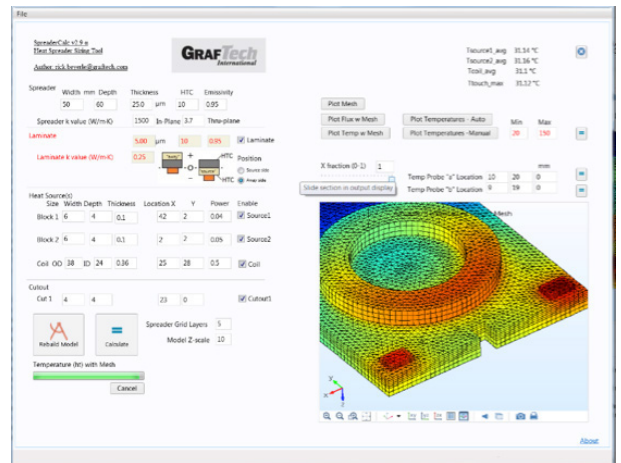


图 25 SpreaderCalc 的仿真 App 比较了消费类电子产品中用于散热的石墨箔的传热性能。

结语

通过本手册展示的案例,我们了解到所有电子设备的设计都涉及到热管理因素。因此,在大多数工程应用中,对系统中引起温度变化的传热机制和因素进行同时研究,有助于更好地理解设计更改对产品性能的影响。

在本手册中,我们还了解了 COMSOL Multiphysics® 软件及其附加产品的功能和特性,以及如何利用 COMSOL Multiphysics® 软件分析设备中的传热和多物理场行为。例如,利用物理场接口、多物理场耦合和后处理功能来研究对流冷却、焦耳加热、相变和热膨胀等现象。

COMSOL Multiphysics® 软件允许用户对仿真 App 的设计和创建进行即时调整,这一功能既简化了合作者之间的沟通过程,又能让更多产品设计流程中的人员参与进来。

通过强大的数值建模,以及对流体流动、传热和机械行为的高保真耦合分析,COMSOL Multiphysics® 软件为电子设备热管理的产品创新提供了支持。附加产品和接口产品为特定的建模需求提供了工具、求解器和参考案例。

此外,COMSOL Multiphysics 软件及其 App 开发工具允许仿真工程师将复杂的仿真转化为支持演示、友好协作的仿真 App,并在整个组织内扩展仿真的强大功能。借助 COMSOL Compiler™ 和 COMSOL Server™,您可以将仿真 App 共享给全球各地的同事和客户。

参考文献

- R1. A. Bejan et al., *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, 2003.
- R2. Analyzing the LHC Magnet Quenches, CERN, Switzerland, *Multiphysics Simulation 2017*.
- R3. Accelerating Custom Capacitor Design with Simulation Apps, Cornell Dubilier, South Carolina, *COMSOL News 2017*.
- R4. Revving up Electrohydraulic Power Steering with Virtual Prototyping, FZB Technology, *COMSOL News 2017*.
- R5. How Fast Do Elevated Temperatures Reach the Cell Interior? NEXT ENERGY EWE Research Centre for Energy Technology, Oldenburg, Germany, *COMSOL News 2017*.
- R6. Meeting High-Speed Communications Energy Demands Through Simulation, Bell Labs, Ireland, *Multiphysics Simulation 2014*.
- R7. Designing Energy-Efficient Photonic Switches to Support Growing Network Traffic, Huawei Technologies, Canada, *Multiphysics Simulation 2016*.
- R8. Enhancing Performance and Safety of Medical Implantable Devices with Multiphysics Simulation, St. Jude Medical, *Multiphysics Simulation 2016*.
- R9. Simulation Apps Bring STEM to Life, University of Hartford, *Multiphysics Simulation 2017*.
- R10. Industrial Applications of Carbon and Graphite for Thermal Management, Graftech, *Multiphysics Simulation 2016*.

更多资源

用户案例集锦

了解仿真专家如何使用 COMSOL® 软件解决电子设备热管理中的设计挑战：

- » 仿真 App 提高产能与收益
AltaSim 公司, COMSOL News 2016
- » 定制仿真 App 促进产业创新
布法罗大学, COMSOL News 2016
- » Medtronic 借助多物理场仿真推进消融治疗技术发展
Medtronic 公司, 多物理场仿真 2015
- » 延长大功率电气系统的使用寿命
ABB 公司, 多物理场仿真 2015

案例下载

阅读以下教程案例和仿真 App 演示文件, 开启您在电子设备热管理方面的建模工作：

- » 散热器
Application ID: 8574
- » 电缆系列教程
Application ID: 43431
- » 含风扇和格栅的封闭空间强制对流散热
Application ID: 6222
- » 平板上方的非等温湍流
Application ID: 56591
- » 圆管中的非等温层流
Application ID: 55861
- » 平板热管
Application ID: 43841
- » 热电冷却器
Application ID: 30611
- » 电子设备中的冷凝检测 (含传递和扩散)
Application ID: 14397
- » 电子芯片冷却
Application ID: 47721
- » 电路板的对流冷却 – 自然对流三维模型
Application ID: 449

论文和技术资料

浏览 COMSOL 用户年会的论文和报告, 以了解更多的有关同行设计的产品和流程信息：

- » 传热与相变
130+ 电子设备相关资源

COMSOL 博客

浏览我们的博客, 获取热管理仿真工作的灵感和指导：

- » COMSOL Multiphysics® 电缆建模:
6 节系列教程
- » 多物理场仿真助力预测微波滤波器中的热漂移
- » 利用仿真 App 优化食品加工工艺中的感应加热技术
- » 捕获永磁电机设计中的涡流损耗
- » 两种模拟电子芯片散热方法的比较

联系方式

了解如何使用 COMSOL® 软件中的数值仿真和仿真 App 设计功能, 完成您自己的建模方案, 请访问 cn.comsol.com/contact。

技术支持: cn.comsol.com/support。

cn.comsol.com

