



COMSOL 工程应用系列手册

多物理场仿真

在建筑物热管理中的应用

目 录

| | |
|--|----|
| 简介 | 3 |
| 工程目标 | 4 |
| 建筑物热管理 | 4 |
| 传热在建筑物设计中的作用 | 4 |
| 传热机理 | 6 |
| 数值仿真 | 8 |
| 建筑与暖通空调设计中的数值仿真 | 8 |
| 使用 COMSOL Multiphysics® 分析建筑环境中的传热 | 9 |
| 基准案例 | 12 |
| 建筑物围护结构开口处的热损失 | 12 |
| 热桥建模 | 13 |
| 建筑材料中的热湿传递建模 | 13 |
| 仿真应用案例 | 14 |
| 模拟太阳辐射对历史建筑中浮雕发生化学降解的影响 | 14 |
| 潜热储能系统中的相变材料仿真 | 15 |
| 模拟热交换器和能量桩 | 17 |
| 结语 | 18 |
| 参考文献 | 18 |
| 更多资源 | 19 |

简介

热管理（根据具体应用领域的不同，又称温度管理、热控制或温度控制）是指借助监控设备，通过冷却或加热手段对温度进行控制。在日常生活中，热管理能够帮助人们营造舒适的居住环境；在工业领域，大多数系统的正常运行都离不开热管理。在建筑领域实现热管理，确保产品设计符合建筑行业各类规范，以及如期投放市场等方面，数值仿真有着不可估量的价值。仿真结果还可以为建筑信息建模（building information modeling, BIM）的过程提供信息，提升建模流程的效率和质量。

在热管理过程中，传热的仿真研究非常关键。然而，仅对传热进行仿真还不足以透彻地理解设计的变化如何影响系统的整体性能，必须充分考虑引起温度变化的物理现象及其影响，才能给出全面的设计方案。

本手册精选了一系列建筑设计领域的热管理应用案例，在这些案例中，COMSOL Multiphysics® 软件为设计理念的评估提供了重要帮助。

我们将对这些应用案例中所涉及的物理场和建模方法进行讨论，包括热膨胀、辐射和对流冷却等物理现象。COMSOL® 多物理场仿真软件具有丰富的功能和多种附加产品，可应用于各种工程领域。

软件还具有多物理场建模和仿真 App 开发功能，是优化任意设备或工艺热性能的不二之选。此外，通过基于多物理场模型开发的仿真 App（如图 1 中的“翅片管”模型演示 App）和 COMSOL Server™ 产品，仿真专业人员可以将研究成果和 COMSOL® 软件的强大功能分享给全球各地的同事和客户。仿真 App 界面简洁，用户可以在其中运行复杂的分析，设计高能效的建筑物热管理系统。

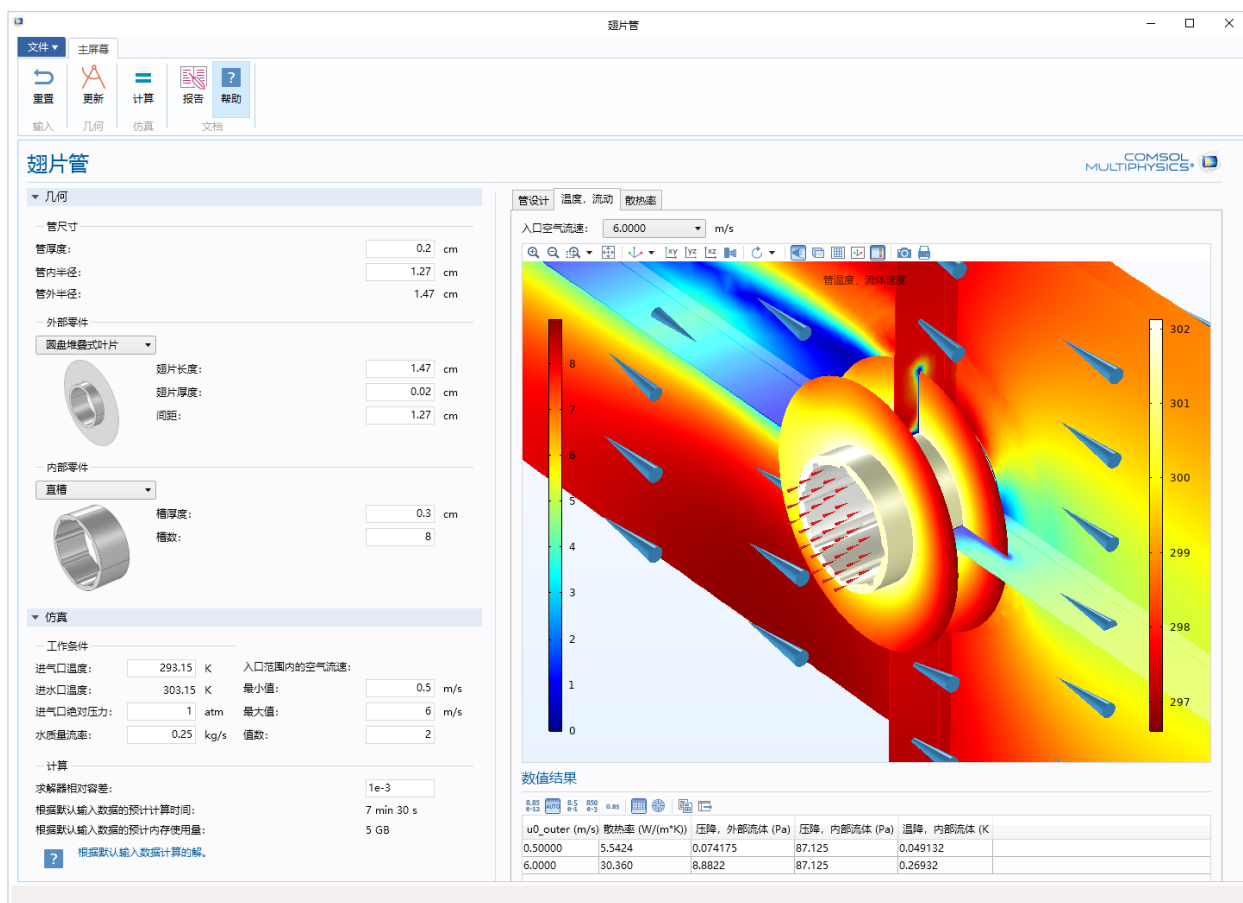


图 1 基于“翅片管”模型开发的仿真 App。访问 cn.comsol.com 在“案例下载”页面查看“翅片管”模型，获取此仿真 App 的详细信息。

工程目标

建筑物热管理

高效的热管理系统是大多数工程设计部门的目标,其中效率、成本、安全性及可靠性等相关因素共同影响着产品的可用性、耐久性和用户综合体验。有些设计仅需对温差进行大致控制;但有些设计需要考虑空间的预期用途,因此要求开发精度更高的热管理系统。

建筑物围护结构的开口是设计热管理系统时重点考虑的因素。在 Schellen 等人正在进行的一项研究中(参考文献 R1),他们利用数值仿真的方法设计玻璃窗,以保留历史建筑的外观特征。通过对热、空气和湿度进行耦合模拟,他们分析了带通风腔的双层玻璃的隔热性能(图 2)。在历史悠久的建筑中,将旧式单层窗(图 2a)改装成现代风格的塑料框双层窗(图 2b)会破坏其古朴风貌。通过仿真的方法研究了不同玻璃窗的改装方案(图 2c)后,他们找到了一个可以避免出现这种问题的替代方案,即使用内侧通风的玻璃窗。该方案的仿真结果(图 2d)显示了室外通风玻璃窗附近的相对湿度,这提示了可能具有的冷凝风险。

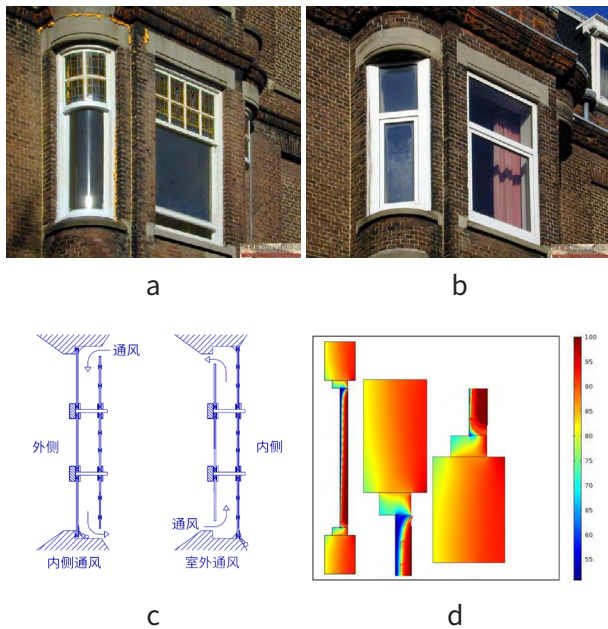


图 2 历史建筑中不同玻璃窗改装方案及数值仿真结果。
图片来源: E. J. Nusselder (a, b), Schellen 等 (c, d)。

传热在建筑物设计中的作用

传热几乎存在于每一个物理过程中。因此,传热研究对于建筑设计的许多方面都至关重要。

热量传递是地板设计中的关键因素。例如,热设计在地板辐射采暖的设计中必不可少。热量在管道中的流体、热活性板和地板装饰之间传递,并最终进入室内空间。图 3a 为辐射地板的原理图,图 3b 为住宅中应用的木质地板,图 3c 为底部热管的红外成像图。

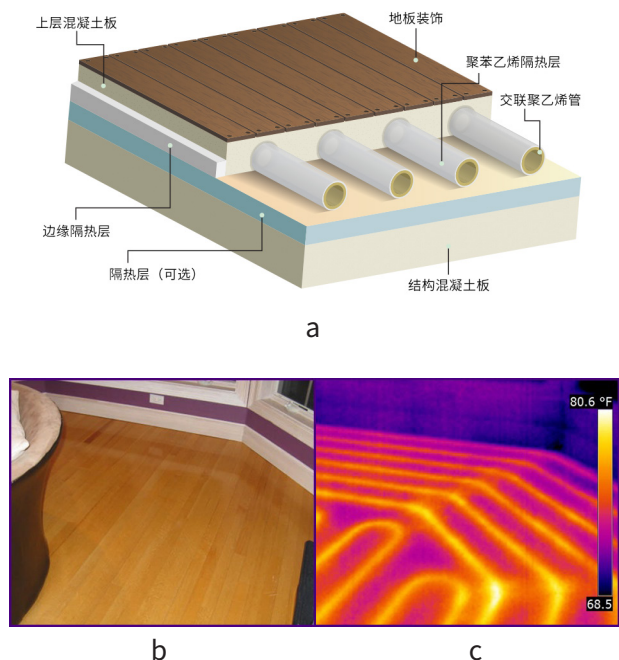


图 3 辐射地板的原理图 (a); 住宅中的木质地板 (b); 底部热管的红外成像图 (c)。

图片来源: Massachusetts Home Inspections (b, c)

传热经常与其他物理过程同时发生,或是其他物理过程最终产生的结果。为了准确描述大多数传热过程,必须考虑材料的热依赖性。例如,当温度变化引起变形时,结构力学分析中必须考虑热应力。

为了评估隔热的性能,在极限温差已知时,需要确定的是传热速率(也称为热量损失)。因此,建筑物和其他围护结构的热设计目标,主要是通过选择导热系数低的材料来最大程度地降低传热速率。例如,通过调整几何结构,可以合理地放置隔热材料,以避免形成热桥或传热速率较高的区域。

除隔热外,通过热交换器还可以在两个区域之间设置给定的传热速率。通过优化流体的流动模式和固体表面的交换特性,可以提高传热效果。

在许多应用中,热管理的目标是防止一个区域的温度高于或低于某个临界值。这样的控制是必要的,可以避免例如热表面融化或由于热循环而导致建筑物地基破裂等问题。

通常,可以使用以下方法来实现维持特定温度范围的设计目标,例如向表面吹入冷空气,添加隔热层或在表面嵌入冷却/加热管道。

为了优化过程效率并探索新的设计,数值计算和仿真 App 在建筑物热管理、减少时间,降低风险和成本等方面发挥着越来越重要的作用。

芬兰 Vahanen 集团的建筑专家(参考文献 R2)正在使用多物理场仿真来研究建筑物翻新(如拆除损坏的热管或使用发泡聚苯乙烯替换现有的保温材料)是否能够保护地基不被损坏。图 4a 为 Vahanen 集团开发的建筑物几何模型,用于评估地基损坏的风险。图 4b 显示了 50 多年未经翻新的建筑物在冬季极端条件下的温度分布。

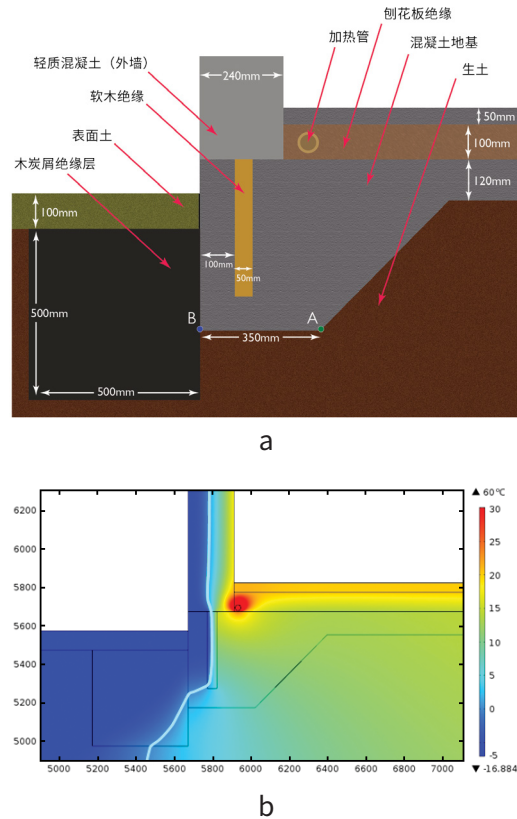


图 4 建筑物在极端天气条件下的基础几何模型 (a) 和温度分布 (b)。

传热机理

热管理需要理解建筑物设计中的各种传热过程。除透明材料（如窗户和门）外，不透明材料（如屋顶和墙壁）中也可以发生热传导和热对流；太阳辐射可以穿过透明窗户使室内升温，室内空气流动会形成热对流；此外，居民及其日常活动产生的热量也必须考虑在内。本节将介绍传热的一些定义和机理，它们是热管理建模和仿真的基础。

传热速率 q' (W) 是指单位时间内传递的能量。能量传递的内在物理机理决定了传热的类型，如图 5 所示。由传热速率方程可以计算出热通量 q'' (W/m²)，即垂直于传热方向的平面或表面上单位面积的传热速率。

热传导是由于分子振动引起的能量传输。对于任何一种介质，只要存在温度梯度，就会产生热传导。热传导公式又称傅立叶定律，可以表示为：

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

由该定律可知，热通量与温度梯度成正比，等于温度梯度与导热系数 k [W/(m·K)] 之积。

与热传导不同，表面附近的热对流是由于流体运动而产生

的。对流是通过整体或宏观运动实现热量传递。根据受到的外力或浮力作用，对流可分为强制对流或自由（自然）对流。牛顿冷却定律常被用作对流问题的边界条件，此时，热通量可以表示为：

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

其中，参数 h [W/(m²·K)] 表示对流传热系数， T_s (K) 和 T_∞ (K) 分别表示物体表面温度和流体温度。

所有物体都以电磁波的形式向外发射能量，即热辐射。当没有参与介质时，温度不同的不透明表面之间会发生辐射换热。表面辐射传热的净速率等于其辐射功率与所接收辐射之差：

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

其中， ϵ (无量纲) 为发射率； σ [W/(m²·K⁴)] 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数； T_s (K) 为表面温度； α (无量纲) 为吸收率； G (W/m²) 为物体受到的辐射。

以上三种传热形式可以同时存在，大多数热管理应用中都应该综合考虑这三种形式。图 6（参考文献 R3）显示了一个中心铺设暖通空调管道的阁楼仿真模型中，每种传热机理的热通量对总热通量的贡献程度。

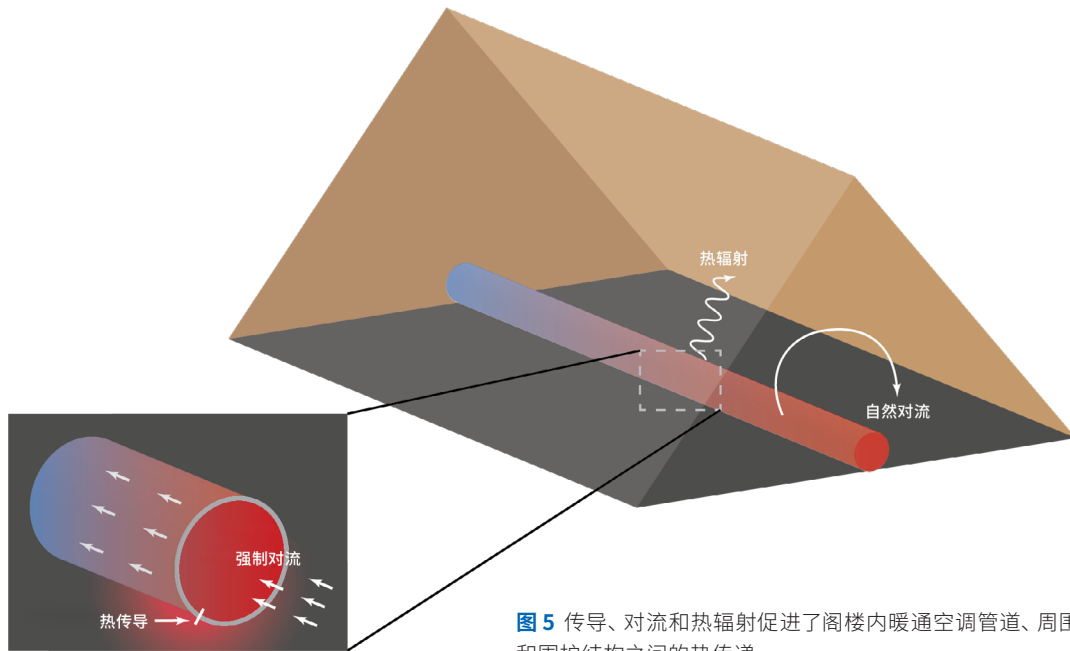


图5 传导、对流和热辐射促进了阁楼内暖通空调管道、周围空气和围护结构之间的热传递。

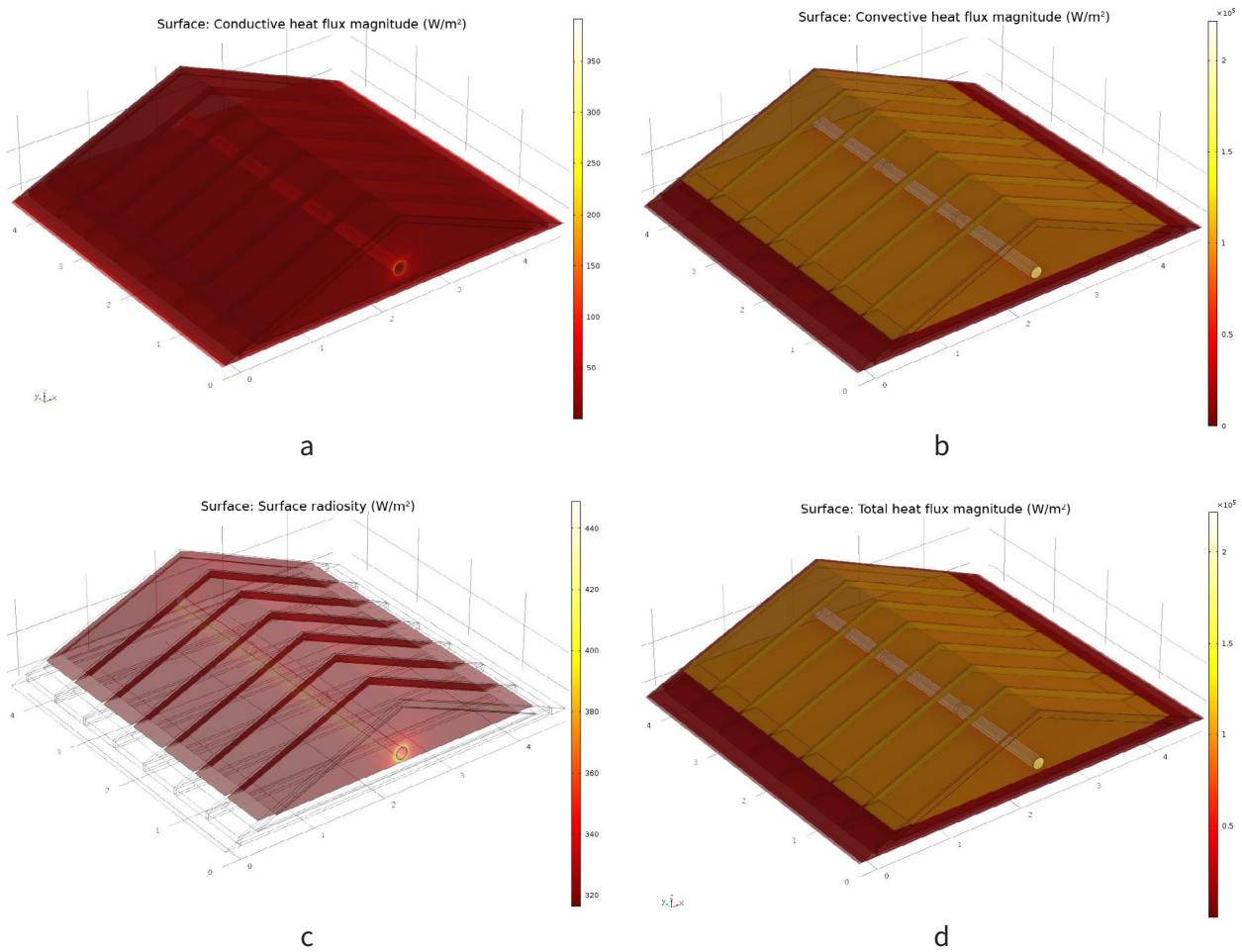


图6 带暖通空调管道的阁楼模型。仿真结果显示了传导热通量 (a)、对流热通量 (b) 和表面热辐射 (c) 对总热通量 (d) 的贡献度。图片来源: Liu 等, 美国弗劳恩霍夫可持续能源系统中心 (Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems)。

数值仿真

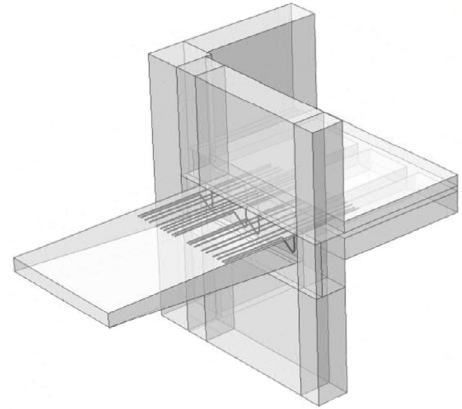
建筑与暖通空调设计中的数值仿真

过去, 建筑结构设计在很大程度上依赖于业界工程师的经验和直觉。现在, 建筑和暖通空调设计工程师的工作得到了数值仿真的大力支持。为了分析这些应用, 仿真软件必须准确地模拟由多个热桥和隔热层构成的复杂结构中发生的传导、对流和辐射传热。例如, 为了对连接混凝土梁和阳台之间的热桥的传热和声学性能进行评估 (图 7a), 意大利佛罗伦萨大学 (University of Florence) 的研究人员采用了一种综合的数值仿真方法 (参考文献 R4), 对不同的隔热方案进行了测试和比较。图 7b 中的总热通量显示一根钢筋产生了较高的热桥效应; 进一步结合声学分析 (图 7c), 他们发现与其他方案相比, 这种钢筋和隔热设计方案的隔热效果不佳。

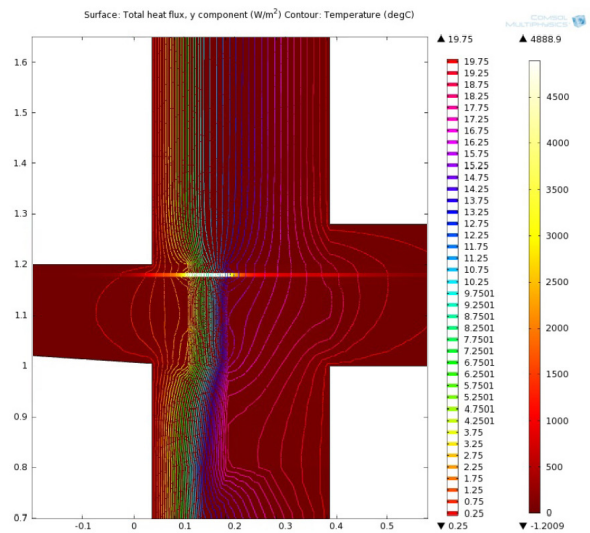
气流可以促进热湿传递, 在建筑物热性能分析的数值模型中, 传热通常与气流和水分输送相耦合。湿气增加不仅会导致物体受潮损坏、滋生霉菌, 危害健康, 还会增加热损失。又因大量热能以潜热的形式存在, 所以蒸发和冷凝会显著影响热平衡。因此, 模型必须耦合流体流动、传热和质量传递, 才能准确地表征多物理场现象。

COMSOL Multiphysics® 软件提供了多个附加产品, 可用于建筑和暖通空调设计的仿真建模。例如“传热模块”可以模拟热湿传递; “CFD 模块”和“管道流模块”可以与“传热模块”结合使用来分析对流传热现象; “声学模块”能够分析建筑结构或侧墙 (包括管道或风道) 中的声音传播; “结构力学模块”可用于计算建筑结构和材料中的热应力。

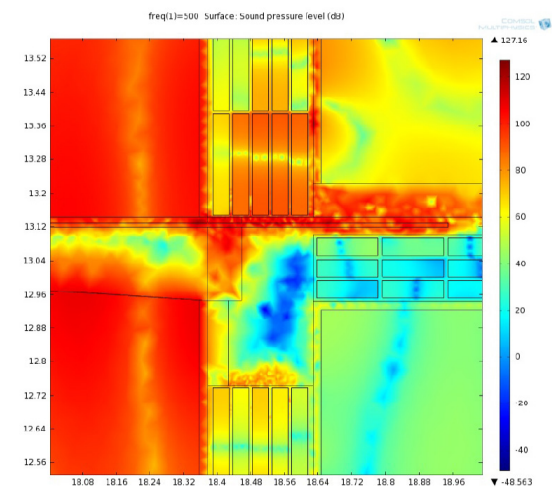
数值仿真可以帮助人们更深入地了解及优化建筑和暖通空调设计方案的热性能, 除了本节介绍的模块之外, COMSOL 软件还提供了各种不同的特征功能供用户使用。COMSOL® 产品套件中的所有模块均支持相互耦合。



a



b



c

图 7 热桥几何模型中的热传递和声音传播仿真建模 (a); 绘图显示了总热通量 (b) 和声压级 (c)。

图片来源: C. Balocco 与 E. Marmonti, 意大利佛罗伦萨大学。

使用 COMSOL Multiphysics® 分析建筑环境中的传热

“传热模块”是 COMSOL Multiphysics® 软件的附加产品,可以与其他物理场进行耦合,扩展软件在传导、对流和辐射建模方面的功能。用户还可以将温度场与速度、压力、湿度或辐射进行耦合,提高热管理仿真的准确性,达到事半功倍的效果。图 8 为只选择“传热模块”时,软件中可用的物理场接口列表。这些接口包含了预定义的单物理场或多物理场,可以帮助用户轻松、方便地模拟各种物理现象。

除了一维和二维轴对称之外,很多物理场接口也能应用于一维、二维和三维空间的瞬态与稳态研究。用户界面右侧有每个物理场接口的简介,软件中还包含该物理场接口更详细的信息。图 9 为一个木质框架墙模型输入界面,显示了下表中接口的使用。该二维稳态模型可用于评估由多种材料制成的墙壁内的水蒸气冷凝风险。

COMSOL 软件在相关的传热接口中内置了标准的天气数据,便于用户准确模拟室外环境条件。这些天气数据来源于全球 6000 多个气象站点,涵盖温度、相对湿度、绝对压力以及每年、每月和每小时的平均风速变化。

选择物理场

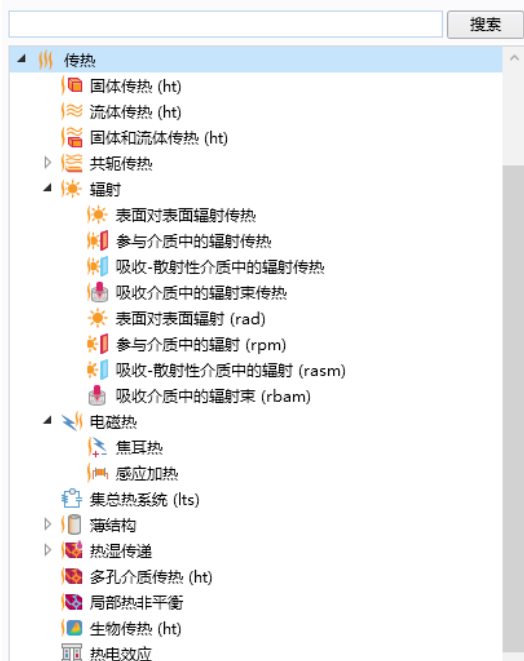


图 8 COMSOL 软件中“传热模块”的物理场接口。

多物理场接口

共轭传热

此接口耦合了传热和单相流两个物理场接口,用于模拟固体传热、流体传热与非等温流体流动,包含层流和湍流。

热湿传递

此接口通过分析热湿存储、潜热效应,以及水分的液体和对流输送,实现建筑材料和湿空气中的热湿传递耦合模拟。

焦耳热

此接口可以将“电流”物理场接口与任意一个“传热”物理场接口相耦合,从而模拟焦耳热。

局部热非平衡

此接口可以从宏观上模拟多孔介质中的传热,其中多孔基体与周围流体或渗入的流体之间存在温差。

热电效应

此接口可以模拟珀尔贴-塞贝克-汤姆逊 (Peltier-Seebeck-Thomson) 效应,将温差直接转化为电压,反之亦然。

单物理场接口

固体传热

此接口可以描述传导传热，也可以分析由固体平移和固体变形引起的热通量。

流体传热

此接口可以分析气体和液体中的传导和对流，以及黏性耗散和压力变化所做的功。

多孔介质传热

此接口可以耦合多孔基体与孔隙中的流体产生的热传导，以及由流体流动引起的热对流。

裂隙传热

当材料厚度方向上的温度差可忽略不计时，此接口可以模拟薄层多孔结构中的热传导和热对流，还可以模拟表面对表面辐射。

薄壳传热

此接口可以描述薄层固体结构中的热传导，还可以模拟表面对表面辐射。

膜传热

此接口可以描述流体薄结构中的热传导和热对流。

表面对表面辐射传热

此接口将表面对表面辐射与流/固体或多孔介质中的传热（包括热传导和热对流）相互耦合。

参与介质中的辐射

此接口可以模拟参与介质或半透明介质内的热辐射。

参与介质中的辐射传热

此接口可以模拟参与介质或半透明介质内的辐射传热。其中“参与介质中的辐射”接口需要使用温度场作为模型输入，此物理场接口则根据此进行计算。

表面对表面辐射

此接口可以模拟边界和外部热源之间的能量辐射传输，其中介质不参与辐射。

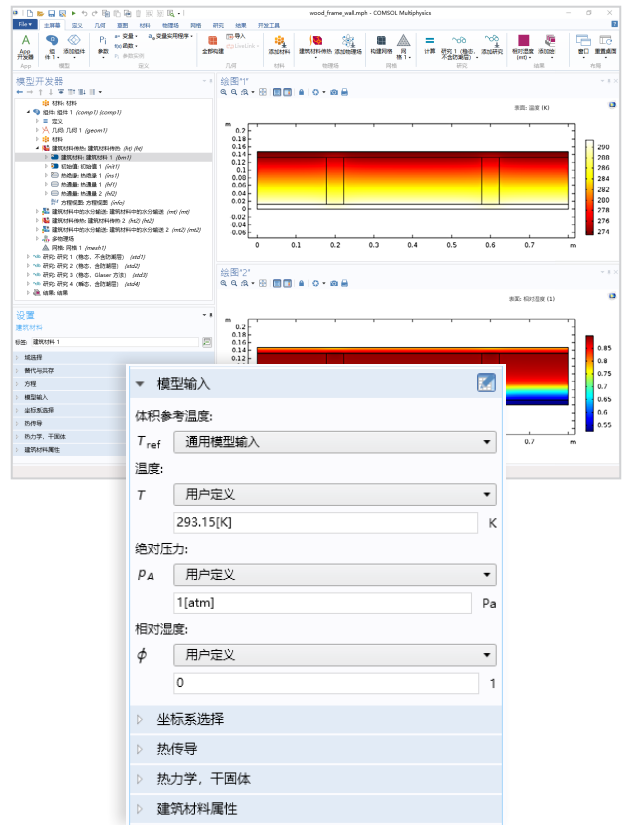


图9 模拟木质框架墙模型输入界面。如需了解更多信息，请查看COMSOL“案例下载”页面中的“木质框架墙的冷凝风险”模型。

解释仿真结果是理解系统内在物理过程不可或缺的步骤。COMSOL 软件提供了多种后处理和可视化工具。利用功能强大的图形工具,用户可以将温度分布、热通量、结构应力、流体流动或电流等现象和变量可视化,这对于热管理设计尤为实用。在图 10 中,后处理功能可用于检查翅片管(加热和冷却系统常用的一种装置)模型中的流体流动和传热。图 10 组合使用了表面图、多切面图和体箭头图,显示了管道域的温度分布与周围空气域的速度大小。

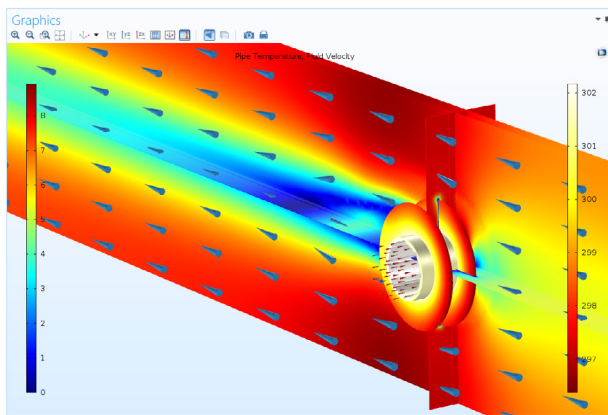


图 10 “翅片管”模型的仿真结果。

全部仿真时间、某个特定的时间范围或时间步都可以生成对应的绘图,这赋予了用户极大的灵活性、更高的效率,以及控制结果展现方式的能力。用户还可以在计算域中放置探针,以此监测某些物理量(例如极端温度或模型中某个零件的平均温度)在求解过程中的演变。

COMSOL 软件中内置了与其他软件连接的接口,为热管理的仿真提供了灵活的工作流选项,详情请参见下方的接口产品列表。通过使用 LiveLink™ 产品,如图 11 所示的 LiveLink™ for Revit®,您可以在外部程序中设计和更新几何结构,建立并运行模型,或与他人分享 COMSOL® 软件生成的结果。图 11 显示了两个楼层与室外环境之间的隔层结构内热传导的仿真结果。

在下面的章节中,我们精选了若干案例,通过它们展示了如何使用 COMSOL 软件准确地模拟建筑结构的传热,以及仿真结果与基准测试的比较。此外,我们还将讨论如何对提高能效的创新技术进行数值验证,并探讨相变材料和能量桩的应用。

接口插件产品

CAD 导入模块

此产品可以导入主流 CAD 软件支持的文件格式和多种原生文件格式。

LiveLink™ for MATLAB®

此产品支持 COMSOL Multiphysics® 软件模型同 MATLAB® 软件和 Simulink® 软件之间的双向链接。

LiveLink™ for Revit®

此产品支持 Autodesk® Revit® 软件和 COMSOL Multiphysics® 软件之间的几何双向同步,也支持导入三维 CAD 文件。

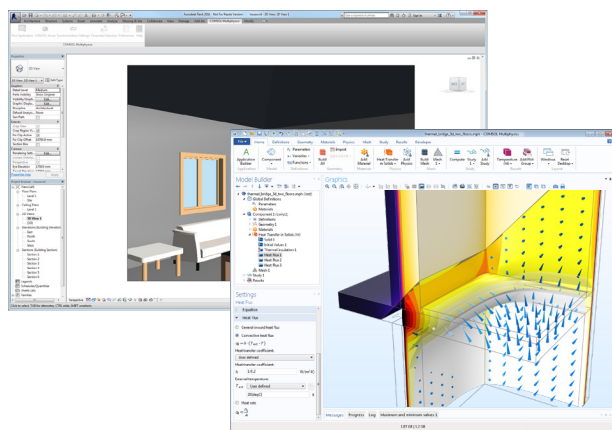


图 11 通过使用 LiveLink™ 产品,用户可以将另一个软件中的几何模型同步到 COMSOL Multiphysics® 软件中。

基准案例

建筑物围护结构开口处的热损失

在整个设计或改造过程中, 建筑物的热性能是一个重要的考虑因素。建筑物热性能的设计目标是尽量减少建筑物开口部位的热损失, 这可以通过仿真技术达到。

本节探讨了两个使用 COMSOL 软件进行分析的测试案例, 二者均可用作模拟建筑物热损失的基准案例。国际标准 ISO 10077-2:2012 规定了窗户、门和百叶窗的热性能。通过将仿真结果与给定的标准进行比较, 可以评估仿真的准确性; 计算得出的窗框型材的热特性结果, 可以用来验证仿真软件的模拟结果。

窗户的热性能高度依赖于窗框的隔热效果。窗户框架中包含许多空腔, 根据与室内和室外介质连接方式的不同, 空腔可以大致分为完全不通风、略通风或通风良好三种类型。如图 12 所示的木质框架中, 嵌入了一个由聚酰胺和三元乙丙橡胶 (EPDM) 垫片制成的保温层, 垫片的作用是防止窗户透水。

借助仿真可以将图 12 中的木质框架与不同的窗框设计方案进行对比, 如由铝、木材、聚酰胺或聚氯乙烯 (PVC) 等材料装配成的具有不同结构的框架。空腔的传热速率可以用当量导热系数 (综合考量了热传导、热对流和热辐射) 表示。

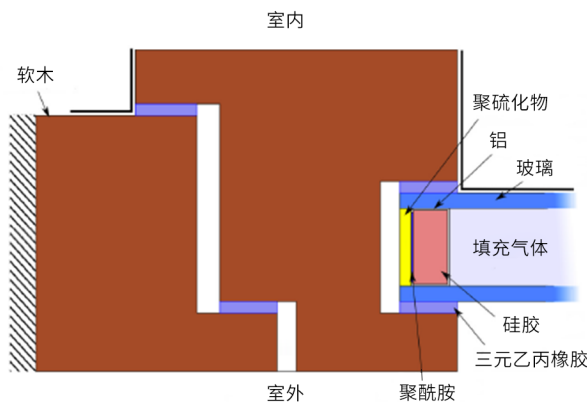


图 12 木质玻璃窗框的几何模型。如需获取更多信息, 请查看“案例下载”页面中的“玻璃对窗户热性能的影响”模型。

图 13 不仅显示了窗户截面上的温度分布, 还计算了热导率, 即窗户的传热速率与室内外温差之商, 结果为 $0.284 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。在此案例中, 热导率的计算值与预期值相差约 0.35%, 精度比要求高了一个量级。

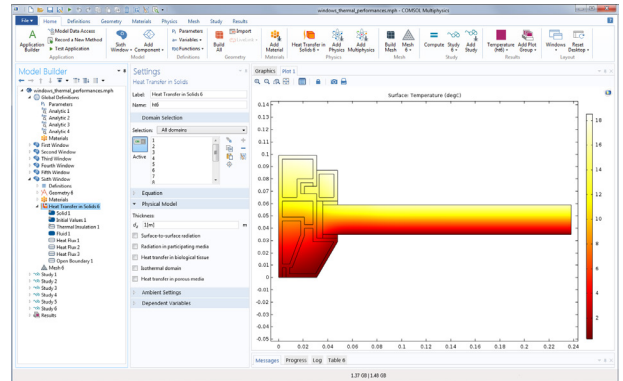
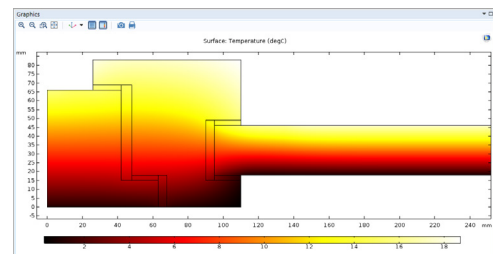
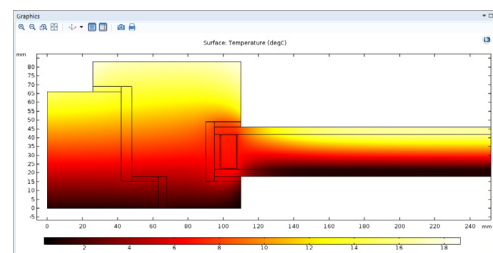


图 13 PVC 窗框的温度分布。如需获取更多信息, 请查看“案例下载”页面中的“窗户热性能”模型。

此外, 还可以计算两层玻璃之间填充气体的对流通量, 以研究其对嵌装玻璃的影响, 得到的温度分布和热导率可以与使用隔热板的仿真结果进行对比。图 14 比较了两种玻璃窗的温度分布, 图 14a 为传统木质边框玻璃窗, 导热系数为 $0.483 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 图 14b 为嵌装隔热板的木质边框窗户, 导热系数为 $0.345 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。这两个计算值都在标准值的 0.5% 误差范围内, 而一般的容差标准为 3%。



a



b

图 14 采用了隔热板 (a) 和传统木质边框 (b) 的玻璃窗中的温度分布。

热桥建模

在建筑结构中,如果某些结构使用了热导率较高的材料,往往会形成热流量远高于周围结构的区域,形成所谓的“热桥”。例如,为了稳固结构,在隔热层中嵌入金属层或金属棒,此处有可能发生热桥现象。与其余结构的表面积相比,热桥虽然看似很小,但它会对热流量分布造成显著的影响。

结构内表面上的最低温度区域和表面热流量是良好的热桥“指示器”,因为它们可用于测量能量损耗和水汽冷凝风险。

针对建筑结构热桥的数值模拟方法,欧洲标准 EN ISO 10211:2007 提供了验证测试案例。COMSOL Multiphysics® 软件成功通过了用于评估软件性能的所有测试标准,被归为三维稳态高精度方法。

图 15 显示了两个热桥的仿真示例。图 15a 所示模型为分隔两个楼层与室外环境的建筑结构,热桥部位是一块具有高热导率的水平长方体,它位于两个楼层之间,此处的热损失明显高于其他区域。在图 15b 所示模型中,热桥由嵌入隔热层的铁棒构成,隔热层与铁棒相交处具有较高的温度梯度。为了方便运行仿真,仅在相交处细化了网格。与各处都使用精细网格相比,这一操作可有效地减少计算量和计算时间。

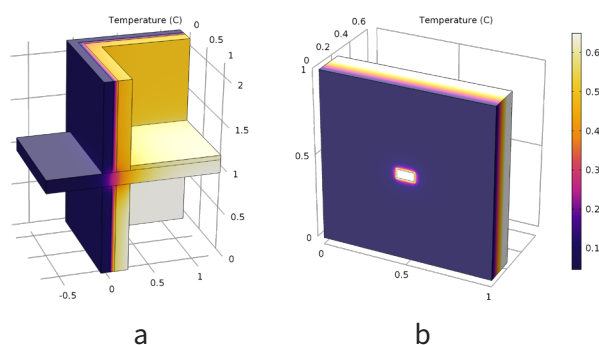


图 15 热桥 (a) 和隔热层 (b) 中的温度分布。如需获取详细信息,请查看“案例下载”页面中“两层楼之间的三维结构”和“嵌入隔热层的铁棒三维结构”模型。

与其他结构相比,热桥部位的尺寸非常小。针对此类情况,软件具有能够以较低的成本模拟具有高/低热导率的层状和棒状结构的功能,从而降低需要进行网格划分的几何复杂性。“传热模块”中的“薄层”支持对薄边界上的材料进行定义,“薄杆”特征则可用于定义大型几何中的导热棒的热特性。

建筑材料中的热湿传递建模

木材、混凝土等大多数建筑构件由多孔材料制成,这要求工程人员必须在设计中加入冷凝控制措施,以防止霉菌滋生和建筑材料的结构性退化。

冷凝的形成取决于室内外的相对条件,主要包括温度、相对湿度、压力、风和降水等。建筑设计和建筑构件锁住或传输液态(或气态)水的能力,影响了建筑材料的性能退化速度和使用寿命。

针对评估吸湿性建筑材料中的热湿传递耦合特性,欧洲标准 EN ISO 15026 中提供了描述相关现象的公式,使用该公式可对多孔材料中的热湿传递进行瞬态量化。

基于该公式的数值仿真可用于验证设计方案是否合理,这些设计方案来源于丰富的实践经验。常用的 Glaser 方法只考虑到蒸汽扩散引起的水分迁移,而忽略了储水量以及热通量和水汽通量对蒸汽压的依赖性。我们可以通过“热湿传递”多物理接口将标准(EN ISO 15026)规定的公式添加到软件中。

根据材料的渗透性能,水蒸气在建筑材料中进行不同程度的扩散,分子通量和克努森扩散通量与蒸汽分压和渗透率的梯度构成函数关系。

液相流动由毛细管压力梯度驱动,可以非常方便地将其表示为湿度梯度的函数。热通量是由热传导和水份通量的相变(蒸发或冷凝)引起的。图 16 的基准案例显示了,经历了 7 天、30 天和 365 天后,20 米长的混凝土结构中温度和储水量的函数分布图。室外和室内空间的初始温度分别为 30 °C 和 20 °C,相对湿度值分别为 95% 和 50%。

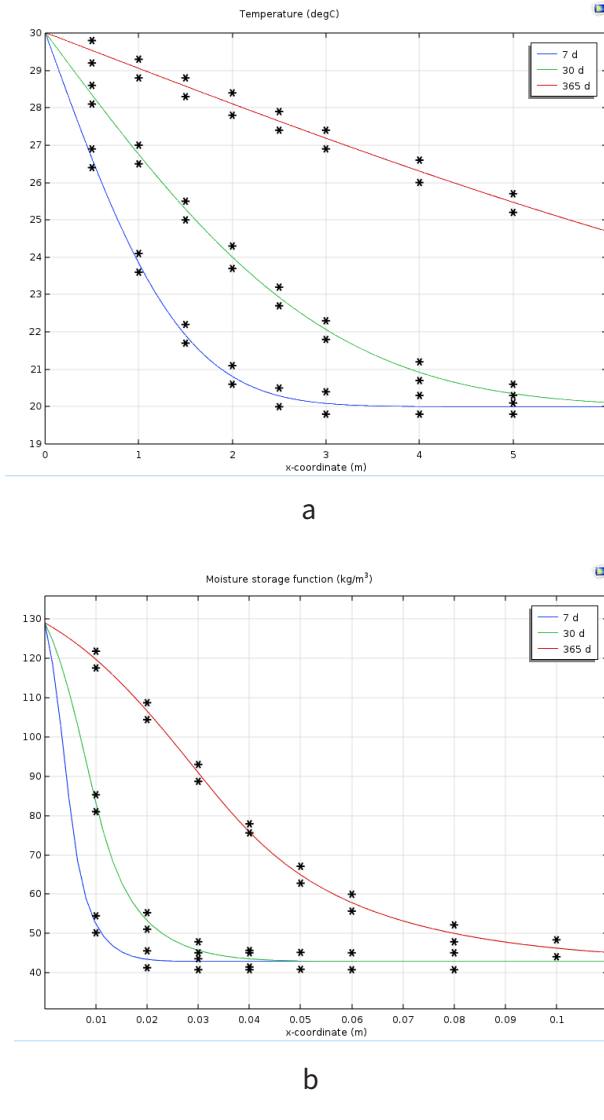


图 16 20 米长的混凝土结构中的温度和储水量函数分布图。如需获取更多信息，请查看“案例下载”页面中的“半无限壁中的热湿传递”模型。

仿真应用案例

模拟太阳辐射对历史建筑中浮雕发生化学降解的影响

研究人员借助仿真软件对历史建筑中客厅的表面辐射传热进行了模拟（参考文献 R5），发现温度变化可能导致浮雕表面发生不同程度的化学降解。

他们使用 COMSOL® 软件建立了模型，目的是基于室外温度、太阳辐射和建筑属性来预测浮雕的表面温度和表面辐射度。热仿真的预测结果表明浮雕可能发生化学降解。

图 17 为矗立在荷兰阿尔默洛 (Almelo) 的 Hofkeshuis 历史建筑的一楼背面图（底层扩建了一座现代化房屋）。它建成于 1775 年左右，以绘于 1778 年的浮雕画为特色。这些原始浮雕着色简单、色调相似、自然悬挂，并且极少被清洁，所以颜料形成的铅皂可以当作化学降解的内部指示标记。



图 17 Hofkeshuis 建筑的一楼。左数前三个窗是客厅的窗户。图片来源：国家文化遗产博物馆。项目编号：162,675。P. van Galen 拍摄，获 CC-BY-SA 4.0 授权许可使用。

浮雕颜料样品的显微成像分析表明,这些浮雕的皂化程度各不相同。考虑到温度和相对湿度能显著影响化学降解过程,因此研究人员尝试使用数值方法来描述它们之间的关系。

仿真模型包含了表面对表面辐射传热和外部(太阳)辐射源,耦合了通过建筑侧墙的热传导、室内空气对流传热和非等温流动,以及辐射传热等物理现象。室外温度和太阳辐照度来源于建筑所在地收集的气象数据。砖、混凝土、玻璃和空气的材料属性可以从软件内置的“材料库”中获取。

案例选取了2013年7月1日至21日室内和室外空气温度和辐射测量数据。首先,计算处于该时间段内(最热的月份)的建筑物表面温度;接着,将预测结果与浮雕上各个位置的实际皂化程度进行比较。图18显示了北墙表面温度的可视化仿真结果:入射的太阳辐射覆盖了大块的墙壁,但墙壁的表面温差很小(1~2°C)。如果要进行更深入的研究,可以加入描述室内气流的湍流模型,并用更精确的值替代一些材料属性的估算值。

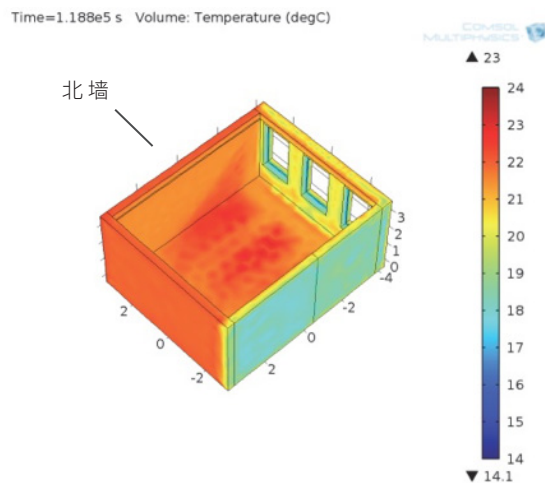


图18 在2013年7月2日上午9时, Hofkeshuis 客厅的表面温度仿真结果。数据来源: Huijbregts 等。

潜热储能系统中的相变材料仿真

随着市场上高性能建筑材料的供应量不断增加,人们开始研发各种新技术来提升建筑供热及空调制冷系统的能效。

相变材料(phase change materials, PCMs)的相变温度范围通常比较狭窄,这意味着它们在熔化和凝固过程中可以储存或释放大能量。由于潜热储能密度明显高于显热储能,因此相变材料能够通过相变高效地储存能量。

相变材料可以在温度升高时吸收热量,温度降低时释放热量,例如白天与黑夜的温度转变即是这样一个过程。在热量逐渐被消耗时,相变材料的变化有利于保持能量供需平衡和提升能效。

通常,人们把相变材料嵌入混凝土等建筑材料的内部,可以与外墙的二氧化硅气凝胶层搭配使用。二氧化硅因具有低热导率和高太阳能透射率而得到广泛应用,它能够保证白天将太阳辐射能储存在相变材料中,而到了夜间则可以将太阳辐射能释放到室内,并且此过程中的热损失极小。图19(参考文献R6)表明,与参照墙壁相比,包含相变材料的内表面热通量的变化更小。在此案例中,相变材料在15°C时发生相变。

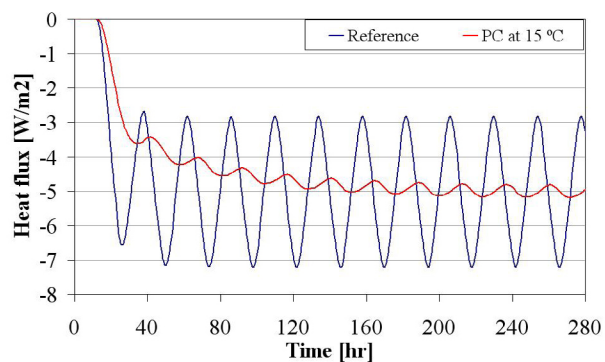


图19 包含相变材料的墙壁(红色)和参照墙壁(黑色)的内表面热通量的对比。图片来源: Baghban 等。

“传热模块”中的“相变材料”特征支持耦合热传导和热对流现象,其中“相变材料”特征使用表观热容公式来计算相变。将此特征与“CFD 模块”的“层流”接口相结合,可以通过添加对应的体积力项来模拟液相的自然对流。此外,由于网格尺寸对结果的影响很大,可以使用求解器中的自适应网格细化功能对相变前沿的网格进行细化,以提高计算精度。

图 20 和图 21 显示了一个使用相变材料的家用热水器中潜热储能系统 (latent heat energy storage system, LHES) 的仿真结果 (参考文献 R7)。这是一个典型案例,可以模拟熔化区域的对流传热对储能性能的影响。通过对温度场使用二阶离散,我们模拟了温度分布 (图 21 a) 和速度分布 (图 21 b) 随时间的变化,并考虑了热传导和热对流的双重影响。图 21a 图中的深蓝色表示固相。

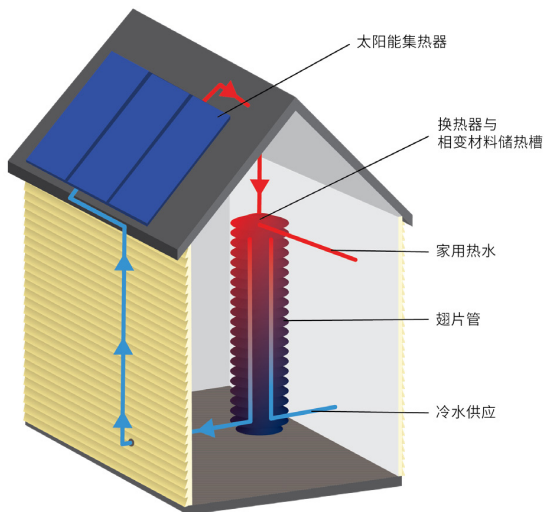
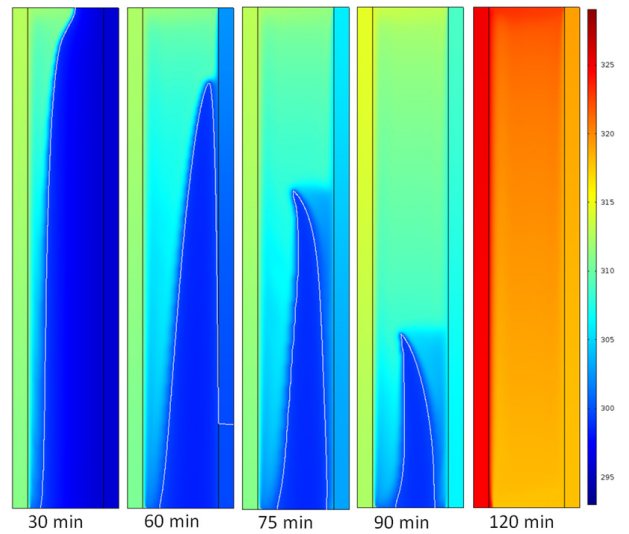
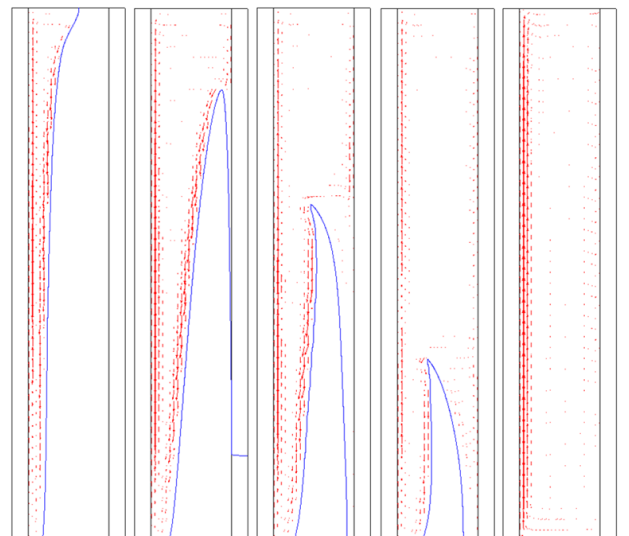


图 20 使用了相变材料的家用热水器潜热储能系统仿真结果。



a



b

图 21 使用了德国 Rubitherm 公司研发的一种商业相变材料 RT25 的家用热水器温度分布 (a) 和速度分布 (b) 仿真结果。绘图显示了 RT25 的熔化过程。

模拟热交换器和能量桩

地面蓄热, 又称季节性热能储存, 是一种高效的长期储能技术, 尤其适用于建筑物的热管理。它的原理是在温暖季节收集并储存热能, 在寒冷季节使用储存的热量。在实际应用中, 将多种储能系统组合使用, 可以将建筑的二氧化碳排放量减少 50%。

闭环地埋管换热器或开环地下水换热器是热量储存的装置基础。典型的闭环装置由一个钻孔构成, 孔内放置了两个用于流体循环的小口径管, 其底部使用 U 形管相连。此类装置可以固定到建筑物的基桩上, 形成能量桩, 如图 22 所示 (参考文献 R8)。

在 COMSOL 仿真软件中, 可以对能量桩及邻近的多孔弹性地面的岩土力学、热力学和水力学进行耦合建模。为了实现水力学和地热学的强耦合, 可以在热方程中添加多孔介质对流项, 并在水力条件中考虑介质密度和黏度随温度的变化; 同时, 温度变化也会导致热膨胀或收缩, 进而产生应变; 孔隙压力会影响力学应变张量, 而修改后的水力学公式可用于计算岩土变形, 软件将自动执行这一耦合过程。

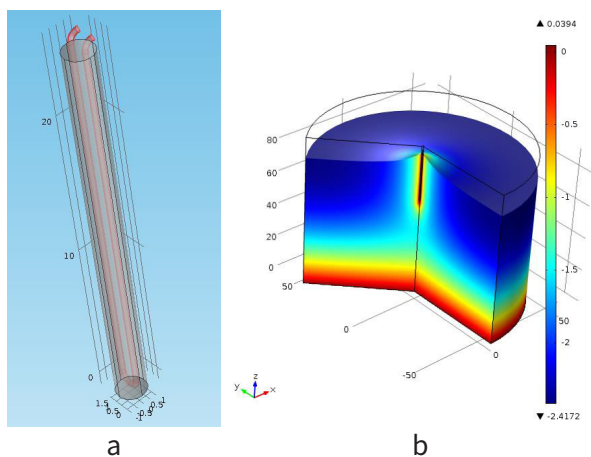


图 22 混凝土基桩 (灰色) 及换热器管道 (a, 红色)。二维轴对称稳态仿真的温度分布 (b)。图片来源: E. Holzbecher 等。

结语

本应用手册介绍了在建筑物围护结构设计及建筑材料的选取过程中, 如何使用仿真工具实现建筑物的热管理。COMSOL Multiphysics® 软件及其附加产品内置了各种各样的单物理场和多物理场接口, 可帮助您轻松地模拟传热、水分传输、结构力学以及其他多种物理效应。

在建筑设计流程中引入数值仿真, 不仅能够测试新理念, 而且可以在投入时间和资金之前, 深入考察拟建结构或翻新方案的热性能。利用仿真技术评估与改善建筑物的热性能, 有利于提升能效、改善人居环境的舒适度, 以及降低建造与维护建筑环境的成本。仿真技术在建筑领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- R1. Schellen, H.L. Heat, Air, and Moisture (HAM) Modeling of Historic Windows. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan.
- R2. Sekki, P. Using Multiphysics Simulation to Prevent Building Damage. COMSOL News 2014.
- R3. Liu et al. Numerical Investigation of Heat Transfer in an Attic Duct Model. Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Boston.
- R4. Balocco, C. and E. Marmonti. Modeling Thermal Bridging at Interface Conditions: Analysis of Solutions for Reducing Thermal Bridges Effects on Building Energy Consumption. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan.
- R5. Huijbregts et al. Computational Modelling of the Impact of Solar Irradiance on Chemical Degradation of Painted Wall Hangings in a Historic Interior. Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge.
- R6. Baghban et al. Numerical Simulation of a Building Envelope with High Performance Materials. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris.
- R7. Groulx et al. Natural Convection Driven Melting of Phase Change Material: Comparison of Two Methods. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston.
- R8. Holzbecher, E. Energy Pile Simulation – An Application of Thermo-Hydro-Mechanical Modeling. Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge.

更多资源

用户案例

了解建筑领域的仿真专业人士如何借助 COMSOL® 软件解决设计难题。

- » 晃动、震颤和摇摆
挪威岩土工程研究院
- » 多物理场分析帮助保存历史遗迹
埃因霍温理工大学, CompuToolAble
- » 为建筑物提供更好的制冷与制热
弗劳恩霍夫太阳能系统研究所
- » 优化复杂建筑外立面的性能
Newtecnic 公司

案例下载

查看以下教程案例与仿真App 演示文件, 开启您在建筑物热管理仿真方面的入门指导。

- » 参数化窗户和玻璃 - 预设模型
Application ID: 16075
- » 参数化窗户 - 预设模型
Application ID: 16077
- » 建筑结构热桥 - 两层楼之间的三维结构
Application ID: 12573
- » 建筑结构热桥 - 嵌入隔热层的铁棒三维模型
Application ID: 12575
- » 半无限壁中的热湿传递
Application ID: 39001
- » 参数化卷帘百叶窗 - 预设模型
Application ID: 16073
- » 木质框架墙的冷凝风险
Application ID: 43871

论文和技术资料

浏览 COMSOL 用户年会的论文与报告, 了解各领域专业人士的产品与工艺设计。

- » 搜索“传热”与“相变”
超过 100 条与建筑相关的搜索结果

COMSOL 博客

浏览我们的博客获取建筑物热管理仿真工作的灵感与指导。

- » 窗户的热性能模拟
- » 建筑中的多物理场仿真
- » 通过建筑物理仿真改进建筑设计
- » 空间圆弧框架的不稳定性评估
- » 建筑设计中的消防系统建模与仿真
- » 室内外空气流动的传热模拟

联系方式

了解如何使用 COMSOL® 软件的数值仿真和仿真 App 设计功能, 完成您的建模方案, 请访问 [comsol.com/contact](https://www.comsol.com/contact)。

获取技术支持, 请访问: [comsol.com/support](https://www.comsol.com/support)。

cn.comsol.com

