

用仿真营造舒适家居

Eurac Research 研究中心的科学家使用仿真技术提高了建筑物的能量利用效率, 并改善了人们的视觉和温度舒适度。

作者 **JENNIFER HAND**

提高建筑物的能量利用效率不仅可以为运营商节省资金, 还能够减少外部环境对建筑内部的影响, 提高建筑的居住舒适度。因此对建筑物而言, 能量利用效率是一个非常重要的因素。建筑外围的任何开口都会涉及窗户结构, 因此能量利用效率也是设计窗户结构时需要考虑的关键因素。窗户的框架、玻璃和遮阳附件, 以及门和天窗等组件对能量利用效率都有重要的影响, 它们可以调整直射进建筑物的阳光, 控制建筑物吸收的热量, 减少眩光, 使得白天时室内光线更加舒适, 并降低居住者对供暖、制冷和人造光源的需求。

ISO 15099:2003 国际标准给出了计算门窗系统热传输和光传输的程序。然而, 窗户结构中不同组件之间的相互作用, 可能对热量传输和光传输有着意想不到的影响, 但 ISO 15099:2003 标准并没有将这一情况考虑在内。标准中给出的计算方法也没有考虑门窗的一些结构特征, 如有些窗户的遮阳系统具有复杂的几何结构, 或者涂覆着特定类型的涂层(如高反射涂层)等。

“标准计算方法的主要问题是, 将所有遮阳系统(例如位于两个玻璃窗格之间的百叶窗)都作为平行层而不是三维结构来处理。”位于意大利北部波尔扎诺市的 Eurac Research 研究中心的研究员 Ingrid Demanega 解释, “尽管一些软百叶窗的百叶片是弧形的(图1), 但在计算时仍被当作空气流过的一维结构的开口处理, 仅采用压

降来计算对流传热数据。而且, 标准计算方法中还将百叶窗作为理想的漫射表面。这些近似的处理方法影响了窗户在光学和热学方面建模的准确性。”

由 Ingrid Demanega 领导的 Eurac Research 研究中心的一个研究团队, 与意大利的波曾-博尔扎诺自由大学(Free University of Bozen-Bolzano)建筑物理研究小组展开了合作研究。波曾-博尔扎诺自由大学的生活实验室中有一套商业化的窗户结构系统(图2), 通过对该系统开展实验测量并与仿真结果进行比较, 研究人员开始研究当前建模方法的局限性, 并提出了新的建模方法。

⇒ 创建新的光学模型

团队利用现有的窗户结构开始仿真工

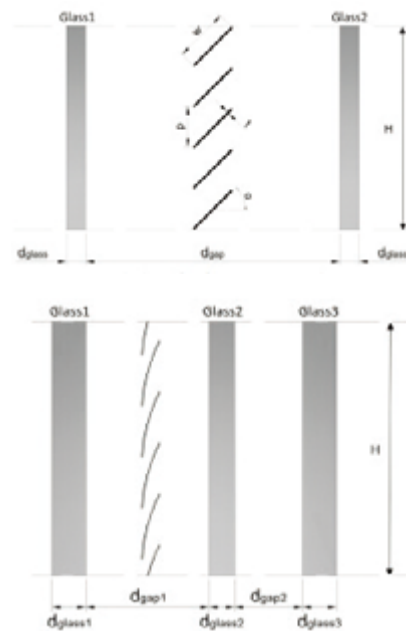


图1. 标准窗户结构(上)和复杂窗户结构(下)。图注:Glass - 玻璃

作。窗户由三层玻璃组成, 包含两个密封腔, 并且在在外腔内有一体式百叶窗。其中的板条呈弯曲形状, 涂有强反射涂层, 这样的设计可以有效地阻挡太阳辐射, 给建筑物内的居住者提供舒适的环境。研究的第一步是采用光学仿真来计算窗户结构吸收的太阳辐射量。



图2. 波曾-博尔扎诺自由大学生活实验室的实验装备, 包括两个热通量板, 一个由因斯布鲁克大学设计的用于测量总热通量的设备, 以及几个用于玻璃表面和空气温度测量的热电偶。

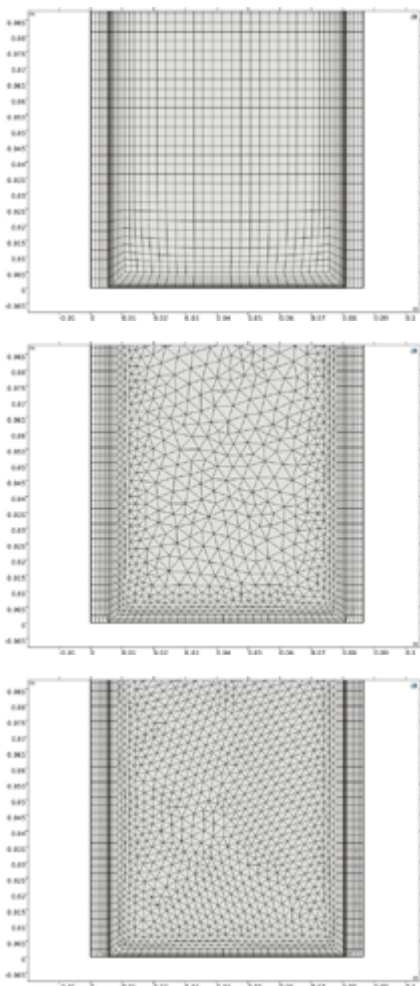


图 3. 有百叶窗的标准窗户结构的网格类型：标准结构化网格（上），粗化非结构化网格（中）和标准非结构化网格（下）。

主要的窗户结构仿真工具，如 Window7，是基于 ISO 15099 标准和光能传递原理设计的，研究人员可以通过添加更详细的建模数据来修改软件。Eurac 团队首先使用 Radiance 软件，利用双向散射分布函数获得数据。该函数描述了太阳光穿过窗户表面时如何分束以及强度的变化，因此适用于具有复杂几何形状和高反射表面的窗户结构。通过射线追踪以及对每块玻璃和每个遮阳组件的分析，研究团队计算了玻璃窗系统吸收的太阳辐射总量。

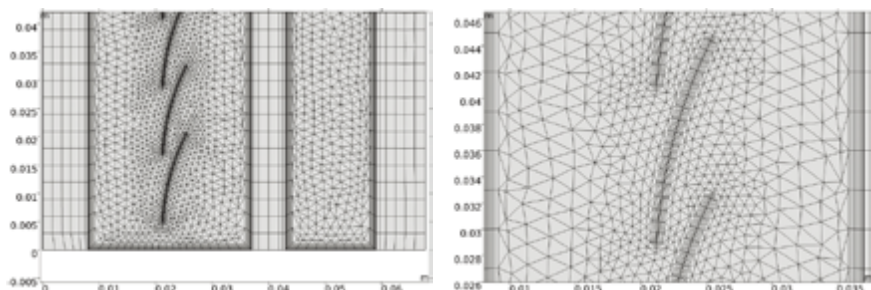


图 4. 左图为仿真所使用的窗户结构，从左到右依次为：第一块玻璃板，包含百叶窗的腔体，第二块玻璃板，仅包含氩气和空气的第二腔体，第三块玻璃板，其中两个腔体是密封的，不通风。右图为百叶窗周围和腔体边缘的网格特写图像。

⇒ 热通量和流体流动建模

研究人员随后将吸收的这部分太阳辐射导入 COMSOL 多物理场仿真软件中开展整体的热仿真建模工作。通过对实验室已有的窗户结构进行建模，Demaneaga 分析了不同网格的灵敏度（图 3）。在预分析中，她使用了布辛涅斯克近似，并分别对不可压缩流体与可压缩流体进行了仿真分析。“我发现，对可压缩流体进行仿真需要的时间要长得多，但两种仿真得到的结果相似，所以我决定在后续研究中使用不可压缩流体模型”她解释道。

为了计算辐射交换值，Demaneaga 对长波辐射采用表面对表面辐射的计算方法。她还创建了两个辐射组：一个用于第一腔体的内壁和腔中的百叶窗，另一个用于第二腔体的所有内壁。

“在考虑了不同的方法之后，我选择使用具有低雷诺数壁面处理的 k-ε 湍流模型来求解流体流动问题。这样就得到了一个结果准确的仿真模型。”

Demaneaga 在不同的区域使用了不同的网格设置：在腔体中使用三角形网格，在边界处使用映射网格。“我不断调整网格尺寸，逐步改进结果直至达到最好。最终的网格中差不多有 20,000 个单元。”（图 4）。

⇒ 稳态仿真

按照国家门窗评定委员会（NFRC）确定的夏季稳态边界条件，室外温度设定为 32 °C，室内温度为 24 °C，太阳辐射率为 783 W/m²。研究人员对百叶窗的三种状态进行模拟，分别是：百叶窗完全关闭的位置状态（此时百叶窗板条与水平面成 75° 角），几乎完全打开的状态（18° 角），以及处在中间的状态（37° 角）（图 5）。“经验证，使用 Radiance 和 COMSOL 多物理场仿真软件进行联合仿真是可行的。这意味着 Eurac Research 团队现在拥有一个强大的工具，可以准确评估复杂窗户组件的温度和通过窗户结构的热流。”

团队成员采用两种不同的方法开展仿真工作。第一种方法是使用 Radiance 软件进行光学建模，计算窗户对太阳辐照度的吸收值，然后使用 COMSOL 多物理场仿真软件计算传热和流体流动；第二种方法则是使用满足 ISO 15099 标准的 Window7 开展标准计算。

作为实验对照，研究团队还使用相同的静态条件对有百叶窗和无百叶窗的标准窗户结构进行了分析。仿真结果表明，对于没有百叶窗的标准窗户结构，两种仿真方法得到的结果一致；而对于有百叶窗的窗户，两

种结果存在很好的对应关系。

⇒ 加入时间变化的瞬态仿真

为了模拟窗户吸收热量的动态变化情况,研究团队将来自当地气象站的数据输入光学仿真软件中,并将窗户内部和外部玻璃的表面温度测量数据作为 CFD 仿真的边界条件。研究人员每隔 300 秒测量一次温度值,然后将这些离散的温度值作为边界条件导入 COMSOL 多物理场仿真软件中。之后用多项式函数对这些值进行插值,并将结果应用于对应的玻璃表面。研究人员将窗户结构内表面上的热通量仿真结果与同一表面上的测量值进行了比较(图 6)。

“我们非常高兴地发现,百叶窗在完全关闭状态下,通过仿真得到的结果与物理测量结果是一致的。由于窗户内外的环境不同,很难准确预测,但是我们的仿真工作通过了考验”, Demanega 解释说。

⇒ 实用的工具

使用 Radiance 和 COMSOL 多物理场仿真软件进行仿真通过了验证,这意味着 Eurac Research 团队现在拥有一个强大的工具,可以准确地评估复杂窗户组件的温度和通过窗户结构的热流。

Demanega 表示,基于仿真结果他们意识到,为了测量由辐射的吸收和再次辐射

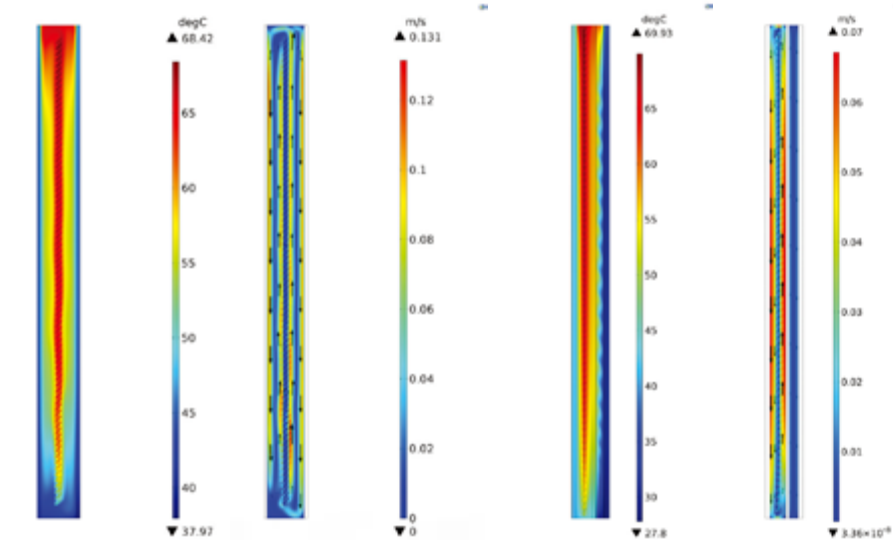


图 5. CFD 结果显示了对流因素对标准窗户结构(左)和复杂窗户结构(右)中窗户温度的影响。

引起的二次热增益,在热建模之前,先建立一个光学模型来了解初始太阳辐射,是非常有价值的。

“标准计算方法不考虑温度的垂直分布情况。而了解腔体、玻璃板和百叶窗的顶部到底部的温度分布是非常重要的,因为这些部件的温度会影响建筑物立面的结构完整性以及内部人员的舒适度。”

凭借所获得的知识,团队正在验证针对不同百叶窗位置的不同仿真方法,并期待将这些仿真方法应用于包含百叶窗的自然通风腔(具有双层外立面的建筑中通常会设有这种结构)。他们还在研究如何在建筑行业内传播这些经验,并正在考虑能否使用仿真

App, 让广大专业人员可以对复杂窗户结构开展更广泛的建模工作。❖

致谢

本研究是在 FACEcamp 项目(编号为: I-TAT1039)的研究活动框架内展开的,由欧洲区域发展基金、Interreg ITA AUT 计划以及波曾-博尔扎诺自由大学的“IBAS——优化能源消耗和室内环境质量的智能楼宇自控系统”项目资助。



Ingrid Demanega, Eurac Research 研究中心研究员

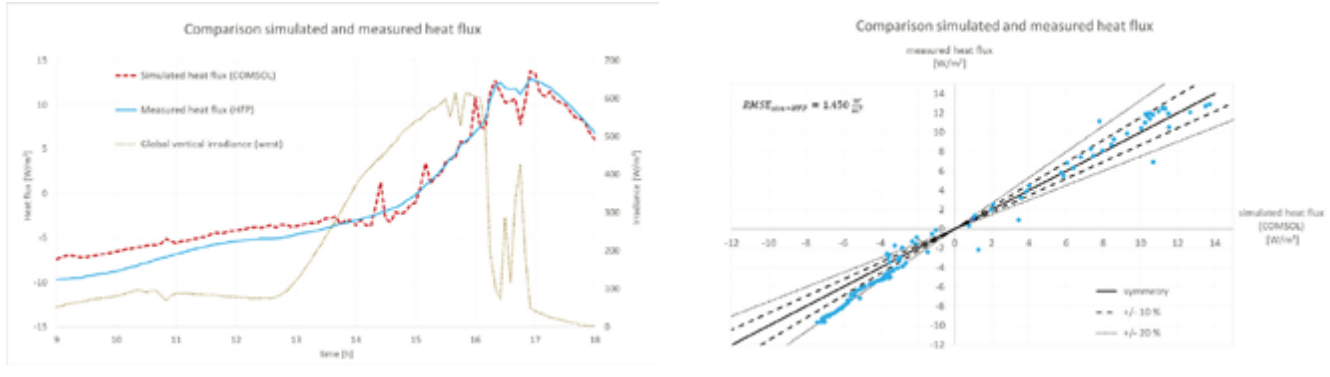


图 6. 以波曾-博尔扎诺自由大学的商业化窗户结构系统为研究对象,对窗户总高度范围内的内侧热通量进行瞬态仿真,得到的仿真结果与物理测量值之间的对应关系。