

基于 BIM 的火灾仿真模拟研究

冷烁, 林佳瑞, 何田丰, 张建平

(清华大学土木工程系, 北京, 100086)

【摘要】建筑火灾仿真模拟在控制建筑火灾风险、指导消防安全设计方面具有重要意义, 得到广泛应用。目前, 建筑设计模型多采用手动输入数据、人工建模等方式录入火灾模拟软件中, 效率低、易出错。本研究借助建筑信息模型 (Building Information Modeling, 简称 BIM) 技术, 通过集成火灾安全信息, 基于数据接口实现模型信息的自动提取、转换与导入, 避免在火灾模拟软件中重复建模, 节约了设计时间, 提高了建模效率和准确度。

【关键词】建筑信息模型; 火灾模拟; 信息转换;

1 前言

随着我国社会经济的发展, 城镇化率不断提高, 建筑火灾问题逐渐凸显, 对火灾的规避与防治成为亟需研究的课题。目前, 我国建筑防火依据《建筑设计防火规范 GB50016》^[1]进行, 主要依靠设定防火间距等经验与半经验的构造措施。而随着计算机技术的进步, 对火灾进行计算机数值模拟得到发展应用, 已成为防火设计的有力辅助方式。近年来, 火灾模拟仿真技术迅速发展, 出现一批如 FDS、Hazard、CFAST 等专业计算软件^[2]。

建筑信息模型 (Building Information Modeling, 简称 BIM) 是集成建筑全生命周期中各项信息数据的技术, 其关键在于信息的集成和共享。BIM 包含建筑的几何尺寸、空间位置、表面材料等信息, 可为火灾模拟提供足量而精确的数据信息。在火灾仿真模拟过程中应用 BIM, 可实现建筑设计软件与火灾仿真分析软件的信息共享, 免去重复建模的工作, 同时提高建模的精准度, 减少因人工建模带来的数据丢失、错误等问题。然而, 目前 BIM 对火灾安全信息的集成度较低, 主流 BIM 软件缺乏火灾模拟所需的燃烧属性信息, 如化学成分、燃烧放热等, 为二者信息共享带来不便。

因此, 本研究将 BIM 技术引入火灾模拟中, 实现材料燃烧属性集成, 模型信息的自动提取、转换和导入, 以及模拟结果反馈。验证表明, 本研究提高了 BIM 的信息集成共享效率, 改善了火灾模拟的效率和准确度。

2 相关研究综述

目前, BIM 与火灾模拟软件之间的信息传递方式主要有两种。方法之一是直接将 BIM 文件导入支持该文件格式的火灾模拟软件中。王婷等^[3]将 BIM 三维模型以.DXF 的格式直接导入火灾模拟软件 PyroSim 中, 并进行建筑物火灾分析, 避免了重新建模的复杂流程, 且保存了建筑模型的完整信息, 但需要人工完成模型导入、网格划分调整等工作, 效率较低。凌竹等^[4]则通过将 BIM 文件转换为 DWG 格式文件, 再将其导入 PyroSim 软件的方法, 并以此为基础分析了首都机场 T2 航站楼火灾情景下的烟气分布、温度和能见度等数据。此类方法可免去软件开发过程, 但须火灾模拟软件识别该格式, 通用性较差, 且转换过程中可能存

【基金项目】第 60 批中国博士后科学基金面上资助 (2016M601038), 中国科协“青年人才托举工程”(YESS20160122)

【作者简介】冷烁(1996-), 男, 清华大学土木工程系本科生。E-mail: lengs14@mails.tsinghua.edu.cn

在信息丢失。

另一种方法将 BIM 中的相关信息提取并转化为火灾模拟软件可识别的格式，并导入软件中进行分析。陈远等^[5]利用 IFC 格式提取 BIM 中的建模信息，包含建筑内的构件信息、防火参数、通风口位置等，并进行了建筑消防安全模拟。道吉草等^[6]则使用 Revit API 提取 BIM 软件 Revit 中对构件的几何描述，通过处理特殊点转换为火灾模拟模型。此方法可针对不同 BIM 软件与火灾模拟软件分别采取相应的转换形式，适应性较强。本研究采用此方法实现 BIM 对火灾模拟软件的信息自动化传递与分析，通过研发 Revit 插件，自动提取建筑模型几何、材料等属性并生成分析文件，同时完成自适应进行网格划分、分析并展示分析结果。

除此以外，BIM 软件对火灾安全信息集成度较低，难以满足信息自动提取的需求。王婷等^[3]采用直接使用 BIM 中材料热力学信息的方法，如热导率及比热容等，在通过.DXF 文件导入火灾模拟软件时，这些属性将自动转化为燃烧参数，但 BIM 软件中材料燃烧信息不完全，只能模拟材料导热状况，无法模拟燃烧情况。道吉草等^[6]则采用新建材料库的方法，记录材料燃烧属性，并与 Revit 材质库一一对应，实现了火灾模拟与 BIM 信息的统一。然而，由于 Revit 本身材料库数量有限，单纯 Revit 材质库难以满足火灾模拟需求。本研究通过对主要建筑材料及其相关属性进行梳理，建立了火灾模拟所需的材料库，并在 Revit 中研发了材料信息集成插件，实现 Revit 模型与火灾模拟材料之间的信息集成。

3 基于 BIM 的火灾模拟流程

本研究采用提取 BIM 模型信息并转换为火灾模拟软件识别格式的方法，实现 BIM 与火灾模拟软件的信息传递。基于 BIM 的火灾模拟主要流程如图 1 所示：

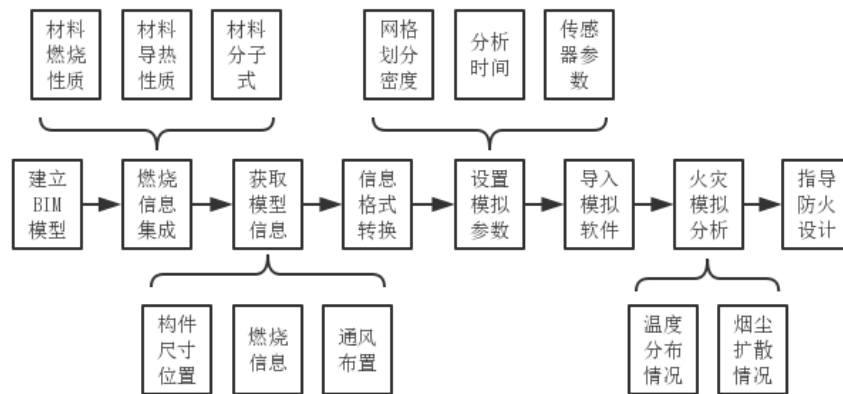


图 1 基于 BIM 的火灾模拟流程

具体流程为：

(1) 在 BIM 中集成 BIM 模型原本不包含的材料燃烧信息，如材料的燃烧热、热导率、分子式等，为火灾分析提供数据支持。

(2) 从 BIM 模型中提取火灾模拟所需的建筑模型信息，包括构件的几何尺寸、空间位置、材料属性、通风口位置等，并对其进行处理，转换为火灾模拟软件可接受的格式。

(3) 综合考虑建筑物的实际环境，设定模型的分析时间、网格划分密度、温度与烟尘传感器位置等各项火灾分析参数，将其添加至由 BIM 模型提取出的建筑模型信息中。

(4) 将建筑模型信息导入火灾模拟软件，进行火灾模拟分析。通过温度、烟气浓度等

分析结果，指导建筑防火设计与人员疏散规划。

4 BIM 模型燃烧信息集成

选取 Autodesk Revit 作为 BIM 建模软件，FDS (Fire Dynamics Simulator, 火灾动态模拟器) 作为火灾模拟软件。Autodesk Revit 软件是目前应用最广泛的 BIM 建筑设计软件之一，同时提供完善的 API 接口，便于二次开发定制相应功能。FDS 是美国国家技术标准局 NIST 开发的火灾模拟软件，可以较为准确地分析三维火灾问题，是火灾安全工程领域的常用软件。

FDS 中定义的燃烧反应模式分为两类：固体或液体反应物的热分解反应和气体反应物的氧化反应。典型的燃烧过程中，固体或液体首先高温分解，产生燃料蒸汽再发生氧化反应。两个过程中均有放热，而煤烟、一氧化碳等有害气体的生成仅在氧化反应中。为准确模拟火灾情况，FDS 提供了多种燃料与材料参数，以描述火灾时的燃烧反应。较为常用的参数如表 1 所示。

表 1 FDS 常用燃烧参数

燃烧参数	中文名称	单位
HEAT_OF_COMBUSTION	燃烧热	kJ/mol
CONDUCTIVITY	热导率	W/(m·K)
SPECIFIC_HEAT	比热容	kJ/(kg·K)
DENSITY	密度	kg/m ³
REFERENCE_TEMPERATURE	基准温度	°C
SOOT_YIELD	烟灰产量	kg/kg
CO_YIELD	一氧化碳产量	kg/kg

其中，热导率、比热容、密度用于描述材料的热传导性质；基准温度指反应速率最大时的温度，用于描述材料的热分解反应性质；烟灰产量、一氧化碳产量分别指单位质量燃料燃烧产生的烟灰、一氧化碳质量，用于描述燃料的氧化反应性质。两种燃烧模式均可由燃烧热描述反应放热情况。

Revit 中不含材料上述信息，故需在模拟分析前先集成燃烧相关信息。本研究首先调研并收集了常见材料及其相关燃烧属性，将其整理至文件数据库汇总。设计师使用 Revit 进行材料定义时，可通过访问数据表单指定构件的材料燃烧属性，也可自定义材料并添加至表单中。用户指定构件的材料属性后，材料燃烧属性将记录在 BIM 文档的构件属性下，在提取 BIM 建筑模型信息时，与构件的几何尺寸、空间位置等一并被提取，并写入 FDS 文件中。材料指定与定义界面如图 2 所示。

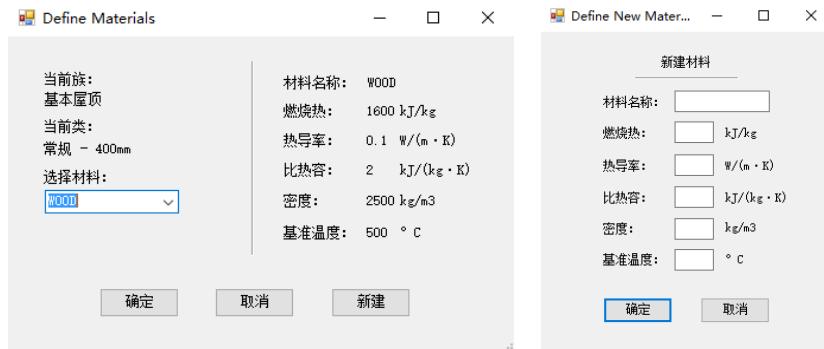


图 2 材料指定与定义界面

5 BIM 模型的提取与转化

本研究采用 Revit 二次开发，实现了由 Revit 向 FDS 软件的信息传递。

Revit 以点、线、面、体的方式描述几何体。通过角点与其他关键点坐标确定边界线，由边界线确定实体表面，由表面确定几何体，每个点均以有限位数的三维浮点坐标表示。每个几何体在数据库中均对应于一个实体，几何体的面、线、点等几何组成作为属性与实体相关联。

FDS 是有限元火灾模拟软件，其空间被划分为多个单元，所有几何体均为边线与轴线平行的长方体，且只能占有整数个空间单元。FDS 采用障碍物命令 (OBST) 创建几何体，几何体的尺寸和位置均由长方体的两对角点唯一确定，FDS 文件中也只记录两角点坐标。上述几何信息与模拟燃烧所需的其他参数一起，以特定格式的语句储存在 “*.fds” 文本文件中。在火灾模拟时，FDS 软件通过读取文本文件中的语句进行建模与分析。

Revit 与 FDS 中对空间几何体的描述和储存方式不同，因此需加以转换。对于 Revit 中边线与轴线平行的长方体实体，其尺寸与位置同样可以通过两对角点唯一确定，此时，直接获取 Revit 模型数据库中几何体两对角点坐标，将其写入 FDS 文本文件中，即可完成信息传递，如图 3 所示：

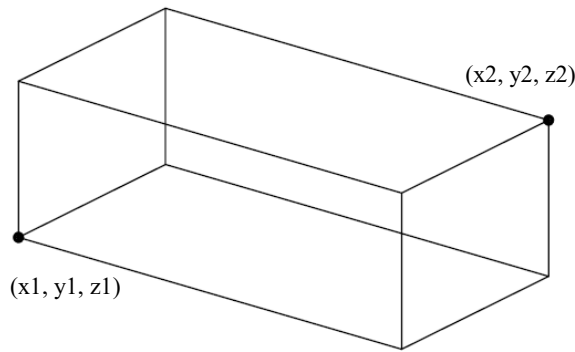


图 3 与轴线平行长方体可直接获取对角角点坐标

对于边线与轴线相交的长方体实体，需通过确定中间点，将斜向长方体划分为多个与坐标轴平行的长方体的方式，逼近真实情况。中间点选取为立方体与长边平行中轴线上各点，中间点间距按以下原则选取：

- (1) 中间点间距需在网格划分精度之内；
- (2) 划分后的模型与真实情况不产生较大偏差。

通过中间点拟合斜向长方体方法如图 4 所示：

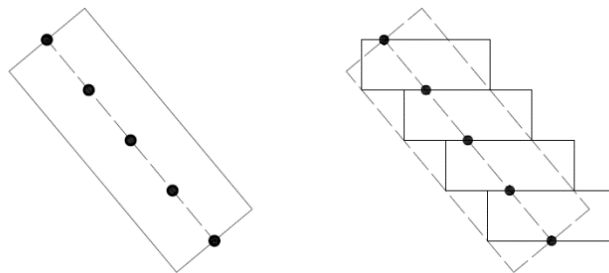


图 4 通过中间点拟合斜向长方体

对内部开洞的实体，如开有门窗洞的墙体等，使用 FDS 提供开洞命令（HOLE）表示。HOLE 命令同样以指定两对角角点，形成空间立方体的形式进行。位于该立方体内的实体单元将全部消除，空单元则维持原样。门窗开洞采取此方法，读出门窗的模型边界，以边界立方体作为开洞立方体，执行 HOLE 命令。

对空间分布更为复杂的曲面体等，理论上也可通过近似拟合方法加以转化，但会产生较大计算量，且拟合出的立方体分布零散，降低火灾模拟效率。故此处采用等效替代的方法，以数量较少的立方体替代。等效替代应尽量减小替代带来的模拟误差，具体替代原则为：

- (1) 尽量不改变原几何体的空间位置、几何尺寸；
- (2) 不改变可燃物性质、总量等影响燃烧的因素；
- (3) 不改变原有空气流场等影响烟尘、热量扩散的因素。

以图 5 所示模型为例，Revit 模型向 FDS 转化方法可总结如下。其中，右侧砖墙边线与轴线平行，直接读取角点建模；左侧砖墙边线与轴线相交，通过中间点拟合建模；窗口为通风口，使用 HOLE 命令开洞；木制家具为复杂几何体，通过等效替代建模。

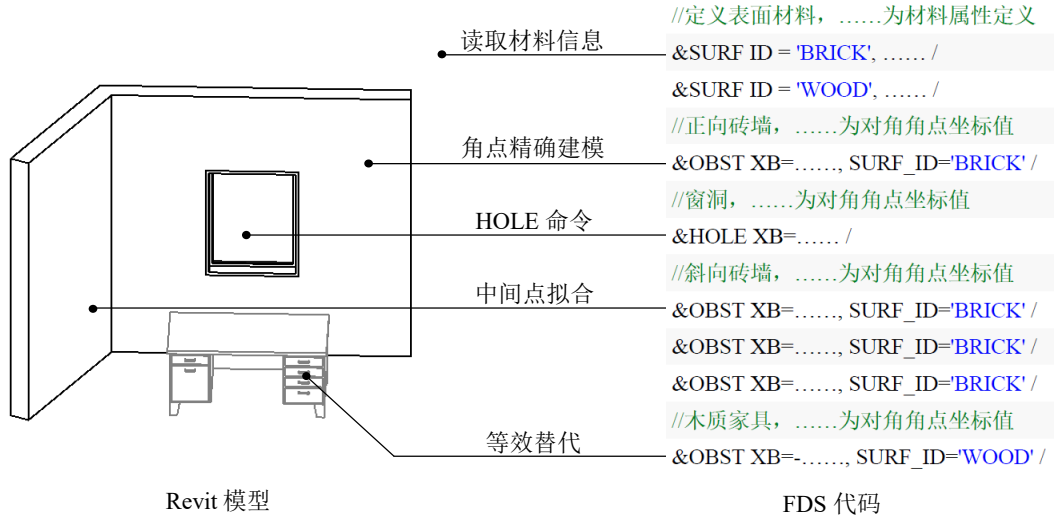


图 5 Revit 模型与 FDS 的对应关系与转换方法

6 实例火灾模拟分析

本研究通过实例模型验证基于 BIM 的火灾模拟效果。图 6 所示为 BIM 中的实例模型。隔墙与家具材质均设定为木材，并集成至 BIM 中构件属性下，通过信息提取与转化，自动设定各项燃烧参数，导入 FDS 中生成燃烧模型。

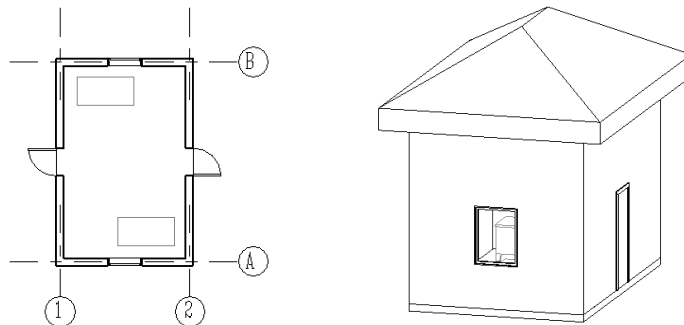


图 6 BIM 中的实例模型

经 FDS 软件提取信息与计算后, 返回模型的温度、反应速率、能量释放、烟尘分布等燃烧数据。 $t=3s$ 时的温度、烟尘分布如图 7 所示。

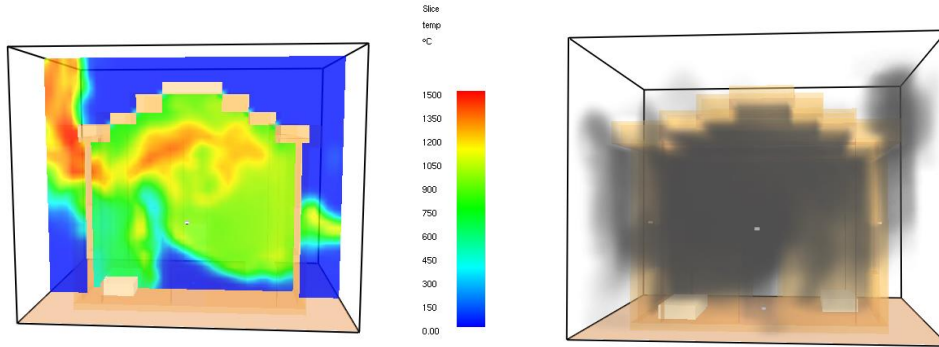


图 7 FDS 计算所得温度、烟尘分布

为量化数据, 在通风口、天花板、楼板等位置自动设置温度和烟尘传感器, FDS 计算时可将设有传感器处的温度与烟尘数据制成表格, 写入记录文件中。为便于在 BIM 中集成燃烧结果、探测器名称以其所在的构件 ID 命名, 使燃烧数据与构件一一对应。 $t=3s$ 时传感器记录烟尘数据如表 2 所示 (单位: %/m)。

表 2 烟尘传感器记录数据

传感器位置	东侧门洞	西侧门洞	南侧窗洞	北侧窗洞	楼板
烟尘数据	5.73	6.74	5.47	2.25	0.00

综上所述, 基于 BIM 的火灾仿真模拟可快速准确还原 BIM 模型, 并给出模拟燃烧结果。所得数据可为防火与人员疏散设计带来极大的方便。

7 结论

本文通过引入 BIM 技术, 实现了由 BIM 模型向火灾模拟模型的转换, 免去了火灾模拟软件中重复建模的过程, 保证了模型的精确性, 提高了火灾分析效率。同时, 将材料燃烧属性集成至 BIM 中, 扩展了 BIM 的应用范围。研究结果经实例验证, 可快速完成建模过程, 并输出多项火灾模拟数据, 供建筑防火设计使用。

参考文献

- [1] GB50016-2014. 建筑设计防火规范[S]. 2014
- [2] 朋延, 贺兆华. 浅谈火灾模拟技术的应用于发展[J]. 消防科学与技术, 2005, (S1): 6-7.
- [3] 王婷, 杜慕皓, 唐永福, 张琦. 基于 BIM 的火灾模拟与安全疏散分析[J]. 土木工程信息技术, 2014, 6(6): 102-108.
- [4] 凌竹, 李鹏哲. 基于建筑信息模型的机场航站楼火灾疏散研究[J]. 科技与创新, 2017, (2): 3-5.
- [5] 陈远, 任荣. 建筑信息模型在建筑消防安全模拟分析中的应用[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(12): 1671-1675.
- [6] 道吉草, 史建勇. 基于 BIM 的建筑火灾安全分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(3): 391-394.