

# 计算机技术在建筑火灾安全上的综合应用<sup>\*</sup>

许 镇, 唐方勤, 任爱珠

(清华大学 土木工程系·防灾减灾研究所, 北京 100084)

**摘 要:** 为通过计算机技术低成本的、高效的、准确的解决建筑火灾安全问题, 对计算机技术在建筑结构火灾安全上的综合应用进行研究, 并以某一小学教学楼为例将应用成果进行展示。首先, 通过 FDS 软件对该建筑某火灾场景进行了火场数值模拟。基于 FDS 的数据, 利用 RCFire 程序进行了结构构件内部温度计算和结构火灾反应计算。最后, 在 Vega 的虚拟现实平台上将构件内部温度和结构火灾反应的结果进行了动态图形展示, 并实现了结构火灾反应的同步漫游。本文将建筑火场模拟技术、结构火灾反应计算技术和场景表现技术上综合应用到同一建筑上, 形成了一个更为准确的结构火灾反应模拟系统, 同时也为进一步的建筑火灾场景仿真奠定了基础。

**关键词:** 结构; 火场; 火灾反应; 场景模拟; 综合应用

**中图分类号:** TU393.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2010)S0-0309-05

## 0 引言

火灾是各种自然灾害中的最危险、最常见、最具毁灭性的灾种之一<sup>[1]</sup>, 容易造成严重的伤亡和财产损失。通过实验手段解决建筑火灾安全问题, 一方面火灾实验成本很高, 另一方面由于火灾的危险性, 一些实验难以操作, 如火灾下人员疏散等<sup>[2]</sup>。因此, 在解决建筑火灾安全问题上, 计算机技术应用越来越广泛<sup>[3]</sup>。通过计算机技术可以对建筑火灾中火场、结构变化、人员疏散等诸多问题进行模拟, 极大的降低了成本, 而且通过合理的模型和模拟方法, 可以高效的、科学的解决建筑火灾安全问题。

在火场模拟方面, 以美国国家技术标准局开发的 FDS 软件和 CFAST 软件建筑火场模拟应用较多<sup>[4]</sup>, 烟气运动情况、气体组分、温度分布等都可以通过计算机火场模拟得到; 在结构火灾反应计算方面, 基于大型通用有限元的软件的结构计算, 如 ANSYS、ABAQUS 等, 已经在有了不少的应用<sup>[5-6]</sup>。然而, 结合火场模拟和虚拟现实平台的结构火灾反应计算相关研究还比较少。本文将火场模拟与结构反应计算相结合, 不使用传统的标准室内升温曲线来进行结构计算, 而采用更为接近实际火灾的基于 FDS 的火场模拟温度数据, 使

得计算更加准确。本文将结构反应计算结果在虚拟现实平台中进行展示, 实现了结构火灾反应的同步漫游, 为进一步建筑火灾场景仿真奠定基础。本文选取某小学教学楼为例, 将火场模拟、构件内部温度计算、结构反应模拟和虚拟现实技术在该建筑中综合应用。本文通过 FDS 进行建筑火场模拟, 利用清华大学自主开发的 RCFire 程序进行构件内部温度计算和结构火灾反应模拟计算, 最后在基于 Vega 的虚拟现实平台中将构件内部温度和结构火灾反应结果进行展示。本文的工作可用于结构火灾安全评估, 为提高结构火灾安全性提供技术支持, 同时也可用于人员火灾安全教育、训练等, 为进一步的建筑火灾场景仿真奠定了基础。

## 1 整体思路

### 1.1 基于 FDS 的火场模拟

FDS(Fire Dynamics Simulator)是美国国家技术标准研究所(NIST)开发的模拟火灾中流体运动的计算流体动力学软件。基于 FDS 火场模拟的应用相当广泛, 本文采用 FDS 的温度数据用于结构构件热传导计算和结构火灾反应计算。此外, FDS 还可以输入烟气组分、热辐射等多种火场相关量, 也可用于实现火灾烟气毒性及综合危害评价<sup>[7]</sup>、

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家科技支撑项目“农村建筑防火与抗火技术与示范”(2006BAJ06B06)

作者简介: 许镇(1986-)男, 汉, 北京人, 博士研究生, 从事火灾数值模拟和虚拟现实技术研究. E-mail: martin31567@gmail.com

人员疏散模拟<sup>[8]</sup>等。

在进行火场模拟计算前，FDS 的几何模型、燃烧条件、网格属性等都需要在 FDS 的输入文件中进行设置。FDS 的燃烧条件需要根据实际模拟燃烧物的情况，查询相关资料，选择合理的燃烧参数，以保证计算的准确性。FDS 的网格属性决定了火场模拟的精细程度，取决于计算需求和计算机配置。

在 FDS 中，几何体必须是三条边与空间坐标系三个轴平行的长方体，而且 FDS 没有相应的建模工具，需要在输入文件中用 OBST 语句创建。建筑的几何模型往往比较复杂，几何体数量巨大，通过手工方式在 FDS 输入文件中创建几何模型几乎难以实现。本文采用基于 AutoCAD 的 ARX 开发的 FDS 建模器<sup>[9]</sup>来实现复杂建筑的 FDS 几何模型的建模工作。本文在 AutoCAD 中建立复杂建筑的几何模型，然后利用基于 ARX 的 FDS 建模器，将整个建筑模型用大量微小的三边与坐标轴平行的长方体进行近似，最终将这些微小长方体的信息用 OBST 语句写入 FDS 的输入文件中。

1.2 基于 RCFire 程序的火灾反应模拟

RCFire 程序是清华大学开发的用于计算混凝土框架结构在火灾下的构件内部温度和结构火灾反应的计算模块<sup>[10]</sup>。该程序采用基于建筑结构分析中常用的纤维梁单元建立的钢筋混凝土梁、柱构件的火灾破坏模拟模型，该模型考虑了火灾下构件的材料与几何非线性问题，可以准确模拟高温下混凝土的压碎、开裂以及钢筋的屈服行为。

RCFire 的输入文件包括力学模型文件、构件温升曲线等文件。在 MSC. Patran 中建立混凝土框架结构的数值计算模型，利用基于 Patran 的二次开发程序可以得到整体结构的力学模型文件。在 RCFire 中，首先需要根据构件温升曲线计算构件内部温度，根据温度计算结果，进行结构火灾反应计算。由于 RCFire 没有展示计算结果图形界面，需要进行具有结果展示功能的后处理开发。

1.3 基于 Vega 的动态场景模拟

Vega 是 Multigen - Paradigm 公司开发的一个面向对象的著名虚拟现实平台，它可以方便地完成场景的设置和漫游控制，并支持许多的特效。本文采用 Vega 平台，根据利用 RCFire 的计算结果来实现构件截面的温度分布随火灾升温过程变化的动态模拟和结构火灾反应随火灾升温过程的逐渐变化的动态模拟<sup>[11]</sup>。

Vega 的文件自身不包含实体模型，只包含场景模型。Vega 首先要加载实体模型，然后将实体

添加到场景中，根据设置好的场景模型来显示图形，实现模拟。本文采用 Multigen - Paradigm 公司推出了一款与 Vega 配套的三维建模软件 Creator 作为 Vega 的实体建模工具，利用 Creator 二次开发的接口 Open Flight API 进行编程开发。

Open Flight API 的几何层次结构是由点到边，再到面，再到实体，再到一个由实体组成的组，最后由若干个组组成了一个库，所有的几何实体数据都存贮在库中。所以在 Open Flight API 中首先要定义点、边、面等层次结构，然后先生成点，再由点逐步构成更高级的层次结构，最终写入库文件中。通过上述方法，利用 Open Flight API 进行编程，读入 RCFire 的结果文件后，就可以创建构件截面模型和结构模型。将这些实体模型加载到 Vega 场景模型中即可实现构件截面和整体结构的图形显示。将不同时刻截面模型和结构模型按照一定时间间隔连续加载到 Vega 场景中就可形成动态展示的效果。

1.4 综合应用思路

本文通过火场模拟获得建筑室内火灾温度数据，然后利用温度数据进行结构火灾反应计算，最后将结构反应结果在虚拟现实平台上实现动态场景模拟。实现了具有精确温度数据支撑、精确的结构计算和良好图形展示功能的结构火灾反应模拟，具体实现流程见图 1。

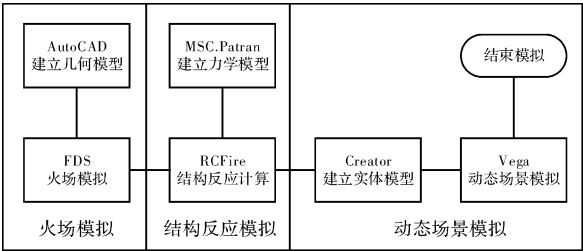


图 1 火场模拟、结构反应模拟、场景模拟综合应用流程

首先在 AutoCAD 中建立建筑几何模型，通过基于 ARX 的二次开发程序转化为 FDS 接受的输入文件，然后在 FDS 中进行火场模拟，得到的温度数据将用于 RCFire 的结构反应计算。在 MSC. Patran 中建立钢筋混凝土框架结构力学模型，利用基于 Patran 的二次开发程序将力学模型转化为 RCFire 接受的输入文件，然后在 RCFire 中进行包括构件内部温度在内的结构火灾反应的计算。结合 RCFire 的计算结果，利用基于 Creator 的二次开发程序建立结构火灾反应的实体模型，最后在 Vega 中加载实体模型，实现结构火灾反应的动态场景模拟。

2 算例介绍

本文算例为北京某一小学的教学楼, 主体为钢筋混凝土框架结构, 底部平台以上共有 4 层 (图 2)。各楼层约为长 60 m、宽 30 m、高 3.9 m 的空间, 占地面积约 1 700 余 m<sup>2</sup>, 主要包括教室、办公室、讲演厅、天井等 (图 3)。

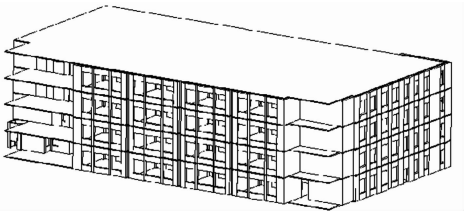


图2 教学楼立体模型

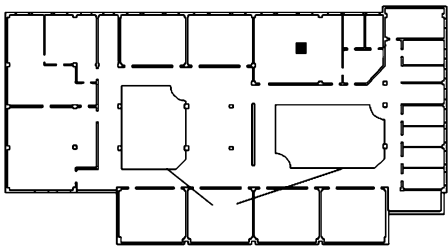


图3 教学楼一层平面图及火源位置

火源设定位于建筑第 1 层的电脑机房内, 如图 3。根据场景中设置的可燃物数量, 参考国内外相似的特征火灾荷载调查数据<sup>[3]</sup>, 确定此次模拟的火源单位面积的热释放速率为 1000 kW/m<sup>2</sup>。将火源等效于单点火源, 火灾荷载大小为 1 000 kW, 火源表面温度为 500℃, 不考虑房间家具陈设等的延烧作用。模拟考虑窗户、门洞等设施产生的通风作用。

3 综合应用

3.1 火场模拟

按照算例中火源设置情况, 在 FDS 中进行火场模拟, 模拟总时长为 30 min (图 4)。经过模拟, 建筑内部的温度分布情况 (图 5)。

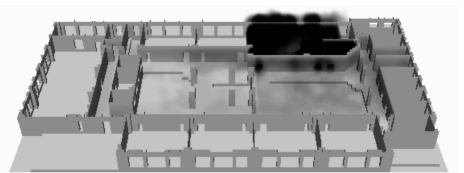


图4 FDS 中火灾发展情况 (10 min)

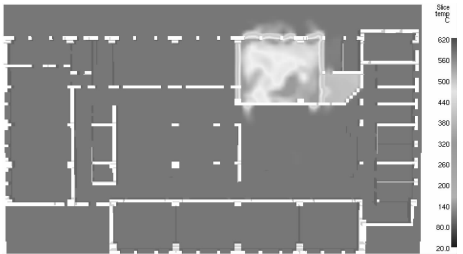


图5 一层室内温度分布 (30min)

通过图 5 所示, 起火 30 min 时, 室内高温区域集中在受火房间内, 且受火房间温度分布较为均匀。因此, 为了简化结构火灾反应计算, 可假设仅受火房间构件受升温作用, 且可将整个受火房间的温升曲线作为构件表面的温升曲线。在受火房间设置若干监测点, 将监测点得到的温度进行平均, 可以得到整个受火房间的温升曲线。该受火房间的温升曲线很快到达 600℃ 左右的最高温度, 然后一直维持在这一温度左右直到 30 min。

3.2 构件内部温度

为了充分检验结构耐火性能, 30 min 后室内升温曲线取 30 min 的温度值进行延伸, 同时, 将温度值乘以 1.4 的放大系数以突出温度作用对结构的危害。由于构件在受火房间的位置不同, 各个构件的受火方式也是不同的, 如室内位于墙上方的梁, 由于墙的隔离作用, 该梁仅底面局部和靠受火房间一侧受火, 可认为是两面受火, 而室内中间的梁, 除上表面外, 三个面都受火。在构件热传导计算中, 首先要设置好各个构件的受火方式, 然后将温升曲线作为输入文件在 RCFire 中进行构件内部温度的计算。将构件内部温度的计算结果利用 Creator 二次开发程序, 建立实体模型, 然后可在 Vega 平台上动态展示构件内部温度变化情况, 以两面受火梁为例, 受火 150 min 的梁截面内部温度变化情况见图 6。

3.3 结构火灾反应

构件内部温度计算完成后, RCFire 利用构件内部温度数据和基于 Patran 二次开发程序获得的力学模型进行教学楼的结构火灾反应计算。将结构火灾反应数据利用 Creator 二次开发程序建立实体模型, 然后在 Vega 中加载, 可实现结构火灾反应的动态展示, 选取 100 min 结构变形情况为例进行展示 (图 7)。

在 Vega 虚拟现实平台下, 不仅能够实现的单纯的图形显示功能, 将结构火灾反应动态展示, 而且还可以实现与结构火灾反应同步的三维漫游,

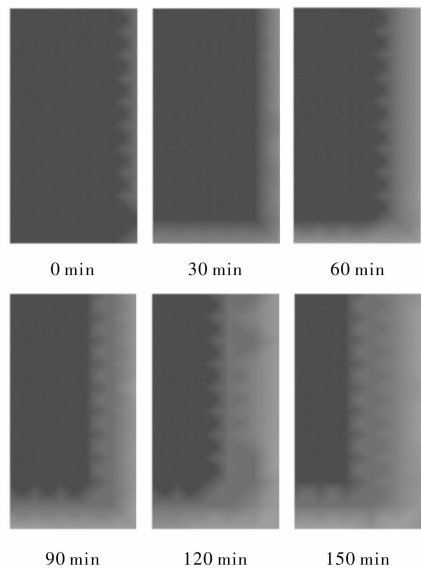


图6 两面受火梁截面内部温度变化

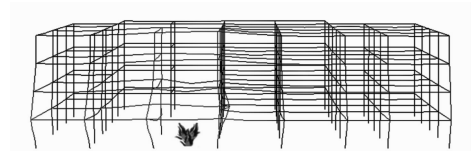


图7 结构在火灾下的变形情况(100 min)

可以使用户在结构火灾反应发展过程中按照用户意愿的位置和角度进行观察,有置身结构变形现场的感觉,图8展示了从远到近逐步观察结构变形的过程。由于采用 Vega 虚拟现实平台,建筑的火灾场景模拟可以加入具有真实感的建筑模型和烟气、火焰等特效,实现结构反应与真实感火灾场景同步模拟<sup>[12]</sup>,以更加真实、全面的表现建筑火灾现场,可用于训练、教育、演示等。

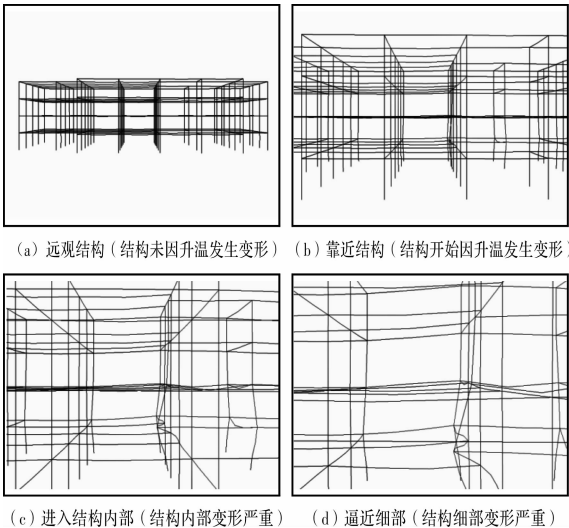


图8 与结构火灾反应同步漫游示意图

4 结论

本文将火场模拟、结构反应计算、场景模拟相结合,实现了具有精确温度数据支撑、精确的结构计算和良好图形展示功能的结构火灾反应模拟。该结构反应模拟用于结构火灾安全评估,为提高结构火灾安全性提供技术支持,同时也可用于人员火灾安全教育、训练等,为进一步的建筑火灾场景仿真奠定了基础。本文在结构火灾安全方面进行了计算机技术综合应用的进行尝试,为推进计算机技术在建筑火灾安全上的应用提供参考。

参考文献:

[1] 江见鲸,徐志胜. 防灾减灾工程学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] 范维澄,孙金华,陆守香. 火灾风险评估方法学[M]. 北京:科学出版社,2004.

[3] 赵子新,李进,李引擎,等. 北京奥运工程性能化防火设计与消防安全管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[4] A Salem. Fire engineering tools used in consequence analysis [J]. Ships and Offshore Structures, 2010, 5(2): 155-187.

[5] Shi JY, Li YQ, Chen HC. Application of Computer Integration Technology for Fire Safety Analysis [J]. Tsinghua Science & Technology, 2008, 13(1): 387-392.

[6] 傅传国,王广勇,王玉镯. 火灾作用下钢筋混凝土框架节点温度场分析[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(1): 1-8.

[7] 许镇,唐方勤,任爱珠. 建筑火灾烟气危害评价及应用[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(8): 651-655.

[8] 唐方勤,任爱珠,徐峰,等. 火场人员疏散的虚拟现实模拟研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(2): 32-36.

[9] 吴炜煜,高佐人,任爱珠. 基于 FDS 的火场空间物理建模器研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(08): 1800-1802.

[10] 陈适才. 火灾下混凝土结构的数值计算模型及其软件开发[D]. 北京:清华大学防灾减灾及防护工程研究所,2007.

[11] 许镇,陈适才,任爱珠. 基于虚拟现实环境的结构火灾反应模拟[C]//第十四届全国工程设计计算机应用学术会议,杭州,2008: 284-289.

[12] 许镇,任爱珠. 基于 Vega 的建筑火场与结构火灾反应同步模拟[J]. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(1): 63-71.

# Integrated Application of Computer Technology in Building Fire Safety

Xu Zhen, Tang Fangqin and Ren Aizhu

(*Institute for Disaster Prevention and Reduction, Department of Civil Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** To make computer technology into a low-cost, efficient and accurate solution of building fire safety, the integrated application of computer technology in structure fire safety is studied in this paper, and a teaching building is selected as a study case to show the application of these technologies. The fire numerical simulation for a fire case of this building is implemented by FDS software. Based on the data provided by FDS, the inner temperatures of structural components and the structural fire responses are worked out by the RCFire program. The Vega software realizes the dynamic graphic display for the results of the RCFire and the walkthrough synchronous with the structural fire responses of this building. Fire simulation technology, calculation technology of structural fire responses and scene simulation technology are synthetically applied in this building in this paper. The work of this paper realizes a more accurate simulation system for structural fire responses and lays a foundation for the further scene simulation of building fire.

**Key words:** structure; fire; fire response; scene simulation; integrated application

.....

(上接第 299 页)

# A Study on Site Location of Major Hazards Based on GIS

Gao Huiying, Guo Hongxia and Feng Qimin

(*Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** In recent years, the security problem of city major hazards has become increasingly prominent and threatened the health and safety of city development, therefore, the research on city major hazards location becomes an important study in modern society. GIS spatial analysis technology is introduced to process the space information that influence major hazard installation, and combine city zoning map road map, land use planning map, urban remote sensing images, and urban infrastructure map with to obtain appropriate location of the feasible region. Using fuzzy synthetic evaluation theory, the studies selected the impact factors and comments to analyze feasible domain by fuzzy evaluation. An example has been demonstrated that this method is probable in site location of major hazards. Therefore, the study on site location of city major hazards has realistic significance, which helps to improve the overall level of city security, and provide technical support to urban security layout research.

**Key words:** city security; major hazards; site location; GIS spatial analysis; fuzzy synthetic evaluation