

基于建筑信息模型与 Pyrosim 软件的地铁车站 火灾模拟仿真方法*

吕希奎 白娇娇 陈 瑶

(石家庄铁道大学交通运输学院,050043,石家庄//第一作者,教授)

摘 要 预防火灾事故是地铁车站应急管理重点之一。基于 BIM(建筑信息模型)的二次开发技术,实现了对 BIM 中材质信息的有效、快速、准确的提取,解决了 BIM 和 Pyrosim 软件间的数据传输关键问题。在此基础上,将 BIM 集成在 Pyrosim 软件,实现了基于 BIM 的火灾模拟,得到了火灾模拟信息和以及关键位置的可用安全疏散时间,从而建立了一套基于 BIM 的地铁车站火灾模拟仿真方法。仿真模拟验证表明,该方法能较好地发挥 BIM 的优越性。

关键词 地铁车站;建筑信息模型;Pyrosim 软件;火灾模拟;可用安全疏散时间

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.06.033

Metro Station Fire Simulation Based on BIM and Pyrosim Software

LYU Xikui, BAI Jiaojiao, CHEN Yao

Abstract Prevention of fire accident is one the key points in metro station emergency management. Based on the secondary development technology of building information modeling (BIM), the material information in BIM model can be extracted effectively, quickly and accurately, thus the data transmission problem between BIM and Pyrosim software is solved. On this basis, BIM is integrated into Pyrosim software to achieve the BIM based fire simulation, the fire simulation information and the available safety evacuation time at each key position are obtained. Thus a fire simulation method based on BIM for metro station is established. Typical station fire conditions are simulated and verified, the results show that the research method can give better play to the advantages of BIM technology.

Key words metro station; BIM; Pyrosim software; fire simulation; available safety evacuation time

Author's address Shijiazhuang Tiedao University, 050043, Shijiazhuang, China

地铁车站火灾应急演练,以及火灾发生后的人员安全疏散和救援是地铁应急管理的重要内容之一。针对地铁车站火灾的应急管理,文献[1]以某地铁车站为例,使用 FDS(火灾烟气模拟)软件研究了火灾时温度和烟尘的分布情况。文献[2,4,11,13]以 FDS 软件和 Pathfinder 人员疏散模拟软件,建立了地铁车站人员疏散模型,从人员逃生率、可用安全疏散时间利用率等方面进行了分析。文献[3,5,10]采用 buildingEXODUS 软件,对地铁车站的人员疏散时间进行了模拟。文献[6]利用 Pyrosim 软件、文献[7]采用 Anylogic,软件对地铁列车环境的人员疏散进行了仿真。文献[8]采用火灾场模拟和人员疏散动力学模拟的方法,对高架车站的站厅火灾时的烟气蔓延过程和人员疏散过程进行了计算。文献[9]利用网络优化计算方法,建立了地铁火灾人员安全疏散的模型。文献[14]基于 Unity3D 平台在 BIM(建筑信息模型)中将疏散过程实现了三维可视化展示。

BIM 技术能够集成三维建筑模型,提供精确、全面的建筑信息和建筑物全生命周期的数据共享。当出现火灾等突发事件时,结合 BIM 的可视化和 BIM 技术的动态模拟,能够为地铁火灾应急管理提供全新的信息化手段,有利于提高当前地铁车站应急管理的信息化水平,提升应急处理能力和处置能力,有利于优化紧急疏散方案。

Pyrosim 是由美国国家标准与技术研究院研发的、以 FDS 软件为基础发展起来的专门用于火灾动态仿真模拟的软件。本文将 BIM 与 Pyrosim 软件结合,针对二者之间数据交流不顺畅、数据接口和数据传输等关键问题,研究建立了一套完整的基于 BIM 的地铁车站火灾模拟仿真方法。在此基础上,选取地铁车站典型火灾工况进行模拟,从而得到火灾模

* 国家自然科学基金项目(51278316);河北省自然科学基金项目(E2016210133);河北省引进留学人员资助项目(CL201720)

拟信息和各关键位置的可用安全疏散时间。

1 Revit 软件与 Pyrosim 软件的数据接口

1.1 Revit 与 Pyrosim 之间通用文件格式分析

为保证火灾模拟仿真结果精度, BIM 和 Pyrosim 软件之间的数据接口和数据传输是关键。Revit 是专门针对 BIM 设计的软件, 可提供建筑设计和文件管理支持。Revit 软件支持的输出文件格式与 Pyrosim 软件支持的导入文件格式对照见表 1。

表 1 Revit 输出与 Pyrosim 输入的文件格式对照表

Revit 支持导出的文件格式	Pyrosim 支持导入的文件格式
Rvt\Rfa	psm
DWG/DXF/DGN/ACIS	DXF
行业基础类 IFC	FDS
gbXML	
三维视图文件 FBX	

从表 1 可知, Revit 软件和 Pyrosim 软件数据流通的通用文件格式为 DXF 格式。因此, 可将车站应急管理 BIM 从 Revit 软件中以 DXF 格式导出, 然后将此 DXF 文件导入 Pyrosim 软件中。

1.2 DXF 格式文件进行数据交流存在的问题

通过分析 DXF 格式文件的结构可知, 在 Revit 软件中建立的建筑构件会先被拆分为点、线、面等一些比较基本的几何元素, 然后这些基本几何元素以一定的规则被存储于 DXF 文件中。在传输和存储的过程中, BIM 中所携带的重要信息(如材质等)会丢失; 而某些构件的材质信息会对火灾走向、发展趋势等有重要影响, 并直接关系到能否得到准确的、符合实际情况的模拟结果。因此, 如何快速、准确地实现 BIM 中参数信息的提取显得尤为重要。

1.3 基于 Revit 软件二次开发实现材质参数提取

通过 Revit 软件明细表导出材质或 DBLink 插件方式, 需要人工处理大量数据。为了实现材质信息的快速自动提取, 利用 Revit 软件应用程序编程接口二次开发技术可实现对材质参数信息(参数、密度、比热、热传导率等)快速、全面、准确地提取, 使得 Revit 软件与 Pyrosim 软件间数据交流更顺畅, 进而得到更客观的火灾模拟分析结果。以提取墙材质参数信息为例, 其程序运行流程如图 1 所示。

经对比发现, 二次开发提取出来的数据与试验模型中的数据一致, 证明了该程序的准确性, 避免了 DXF 格式文件导入 Pyrosim 软件后需要手动查询材质参数信息的低效率方式, 也避免了个别构件属性被遗漏的情况。

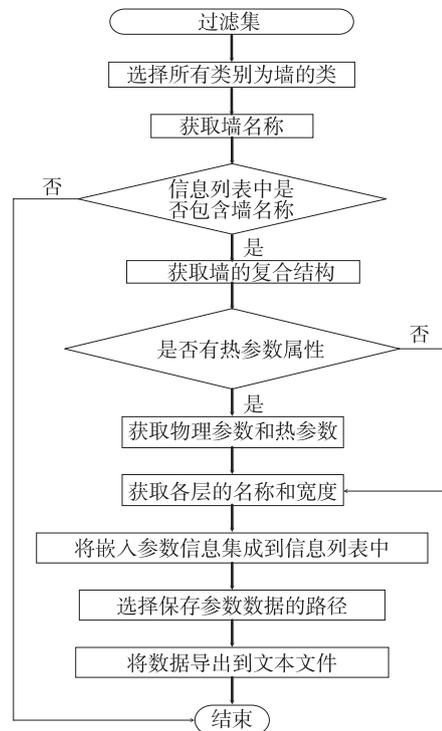


图 1 提取墙材质信息参数程序流程图

2 基于 BIM 的地铁车站火灾模拟

以某地铁车站为例建立了 Revit 模型。其站台层公共区域长 118.0 m, 宽 12.0 m; 站厅层公共区域长 95.0 m, 宽 19.3 m。站台层与站厅层高度差 5.1 m。有 3 部自动扶梯、2 处楼梯、1 处直升电梯。车站有出入口 4 个, 检票口 4 个(2 个进站口和 2 个出站口)。各检票口设 4 个闸机, 各闸机净宽 0.50 m。相邻闸机的中心距离为 0.85 m, 跨度 1.20 m。基于 Revit 软件建立的 BIM 站厅层和站台层平面图分别如图 2 和图 3 所示。

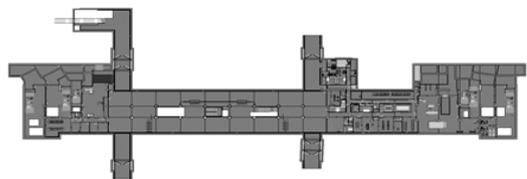


图 2 某地铁车站站厅层平面示意图

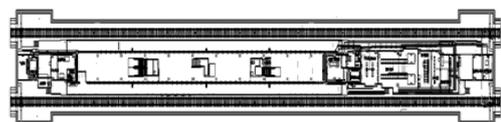


图 3 某地铁车站站台层平面示意图

2.1 Pyrosim 软件火灾模拟流程

使用 Pyrosim 软件对 Revit 软件建立的地铁车

站模型进行火灾动态模拟,模拟出不同火灾场景下烟气流动、温度分布,以及有毒气体浓度等情况,得出的模拟分析结果可为地铁车站后期应急优化措施提供数据支撑。火灾模拟仿真流程如图4所示。

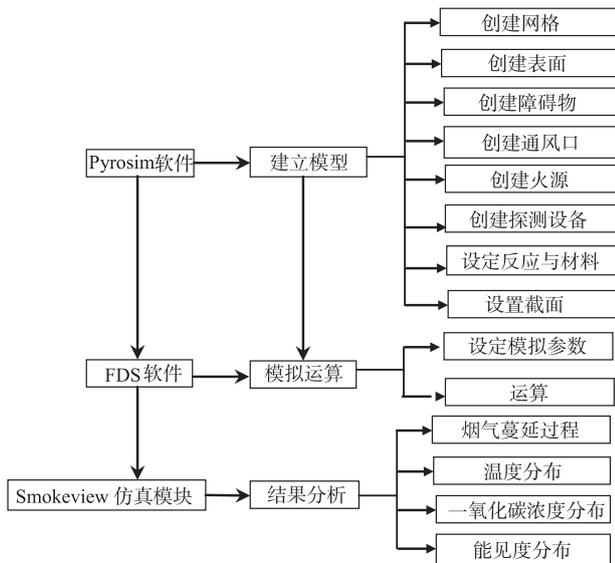


图4 Pyrosim 软件环境下火灾模拟流程图

2.2 地铁车站火灾条件下人员安全疏散的判定

地铁车站火灾情况下,乘客能否全部疏散到安全区域主要取决于“可用安全疏散时间(ASET)”和“人员疏散时间(RSET)”这两个特征时间的比较。前者用 t_{ASE} 表示从“火灾发生时刻”到“火势导致乘客处于危险状态”的时间段;后者用 t_{RSE} 表示站内所有人员疏散到安全区所需时间。如果在火势达到危险状态前站内人员不能全部撤离到安全区,即 $t_{ASE} < k \times t_{RSE}$,则需要优化地铁站内部现有防灾措施及应急措施。其中, k 为取值大于1的裕量系数,以增加疏散的安全性。

2.3 t_{ASE} 的判定依据

地铁车站火灾的危害性主要体现为烟气(有毒气体、无毒气体、悬浮颗粒等)、高温、热辐射等3个方面的影响程度。这3个参数会直接影响疏散效率,严重时会引起人员伤亡及财产损失。火灾烟气对人员疏散影响如图5所示。

基于上述分析并参考人体耐受极限相关指标,采用CO的质量分数、能见度、温度等3个参数的参数值作为判断危险状态的依据。火灾模拟中对各个关键点位置的上述3个参数进行模拟仿真,取出三者分别达到危险状态的时间进行比较,选出最短的时间作为 t_{ASE} 。具体设定的火灾临界危险状态为:

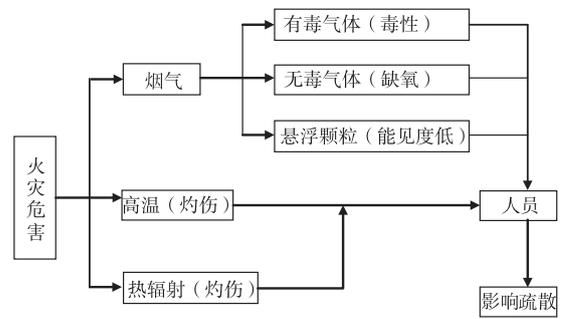


图5 火灾危害对人员疏散的影响关系图

① 2 m 高度处温度超过 60 °C; ② 2 m 高度处能见度低于 10 m; ③ 2 m 以下空间内的烟气层中的 CO 的质量分数大于 $1\ 400 \times 10^{-6}$ 。若某一时刻某区域符合以上任意一个条件,则该区域待疏散人员将处于危险环境中,从而确定火灾发生至此刻的时间段为该区域乘客可利用的逃生时间,即 t_{ASE} 。

3 火灾模拟参数设置

3.1 火灾场景的设定

本文选取了典型的火灾工况进行模拟。设定的火灾工况为:站内无列车停靠,站台公共区起火,模拟火灾发生位置为站台公共区,火源位置在站台层中部。为模拟较不利的火灾工况,根据 ISO/TS 16733《火灾安全工程第4部分:设定火灾场景和设定火灾的选择》选取的火灾增长类型为快速火,火灾规模取 5 MW,火源功率增长系数取为 $0.046\ 9\ \text{kW/s}^2$ 。

3.2 地铁车站火灾模拟网格的确定

本文的火灾模拟主要考虑公共区。根据所选车站模型,建立了 $125.0\ \text{m} \times 26.5\ \text{m} \times 15.0\ \text{m}$ 的长方体网格。为提高模拟精度,在长方体网格模型中,空间将被划分为多个小区域,每个区域都与相邻的区域相连。采用 Exodus 的精细网络法,将长方体网格划分为 $0.5\ \text{m} \times 0.5\ \text{m} \times 0.5\ \text{m}$ 规格的共计 397 500 多个立方体小网格,在保证模拟精度的同时,实现尽可能减少计算量,提高计算网络的经济性。

网格划分完成后得到的最小网络的长、宽、高为 1:1:1,这样能保证模拟精度达到一个最佳的状态。由于超出网格边界的物体会被自动排除在外不参与 FDS 软件的计算,所以划分网格时需要保证参与模拟的物体在网格边界范围内。

3.3 切片及热电偶的布置

在 4 个出入口与站厅层交接位置分别模拟布置 4 组热电偶,用来测量对应关键位置点随时间变化的温度。热电偶具体布置如图 6 所示,图中将遮挡物

进行适当隐藏,使得热电偶分布能直观地呈现出来。

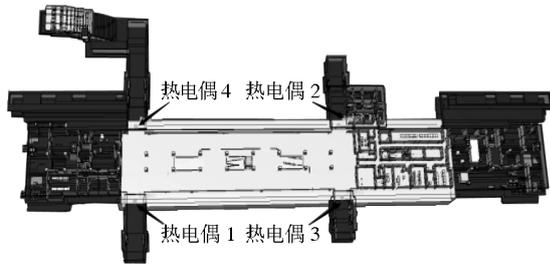


图6 地铁车站火灾模拟热电偶布置图

在站厅层和站台层距地板高 1.5 m 处分别布置切片(如图 7 所示),用于查看温度、能见度及 CO 的质量分数等随时间变化的分布情况。

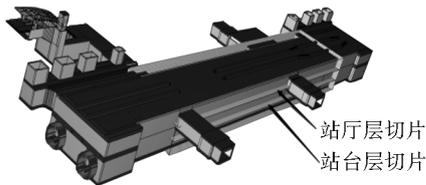


图7 地铁车站火灾模拟切片布置图

3.4 模拟初始条件的设定

火灾模拟的某些初始条件是系统默认的,有一部分需要根据实际模拟情况进行设定。相关参数设置如表 2 所示。

表 2 火灾模拟基本参数设置

基本参数	参数值
环境初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
环境初始相对湿度/%	50
风速/(m/s)	0
模拟运行时间/s	600
火源位置	站台层中心
火灾增长系数/(kW/s^2)	0.046 9
火灾增长类型	快速火
火灾最大热释放速率/(MW/s)	5

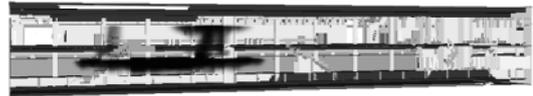
3.5 火灾模拟结果与分析

将火灾发展过程中关键时间点的烟气、能见度、温度、CO 的质量分数分布情况等参数进行仿真。为了更直观地展示各参数的分布情况,在不影响模拟结果的前提下,对车站模型进行剖切或隐藏处理。

3.5.1 火灾工况下烟气模拟

地铁车站火灾烟气发展过程见图 8。由图可知快速火很快产生大量烟气,在 51 s 时通过离火源较近的楼梯口蔓延到站厅层,然后到达站厅层顶部并向周边蔓延;在 71 s 时站厅层烟气通过扶梯口进

入站台层;在 157 s 时站台、站台层公共区域充满烟气。



a) $t = 51$ s 时火灾烟气蔓延情况



b) $t = 71$ s 时火灾烟气蔓延情况



c) $t = 157$ s 时火灾烟气蔓延情况

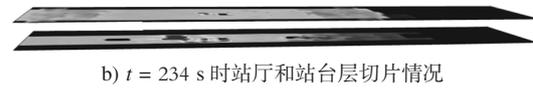
图8 地铁车站火灾模拟下烟气蔓延情况

3.5.2 火灾工况下温度模拟

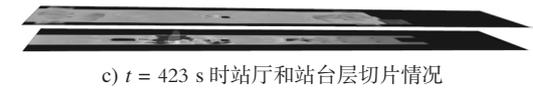
地铁车站火灾模拟过程中温度分布情况如图 9 所示:158 s 时站台层中间楼梯口周围处于危险状态,疏散人员应尽量选择两侧的楼梯或扶梯通道;234 s 时站台层左侧扶梯处及中间楼梯口处达到危险状态,疏散人员应避开这两处通道,工作人员此时应尽量组织疏散人员从右侧楼梯到达站厅层;423 s 时站台层主要疏散通道附近大面积温度达到 60°C ,影响人员逃生;600 s 时站厅层高温区域主要集中在中间楼梯口处,4 个出入口处温度均没有超过临界危险温度,对出入口部分的疏散不构成威胁。



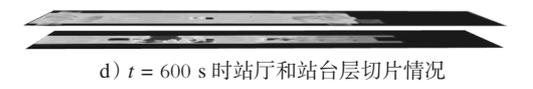
a) $t = 158$ s 时站厅和站台层切片情况



b) $t = 234$ s 时站厅和站台层切片情况



c) $t = 423$ s 时站厅和站台层切片情况



d) $t = 600$ s 时站厅和站台层切片情况

图9 地铁车站火灾模拟下切片温度分布情况

3.5.3 火灾工况下能见度模拟

地铁车站火灾模拟中能见度分布情况如图 10 所示:38 s 时火源周围能见度出现下降;48 s 时站厅层中间楼梯口能见度开始下降;159 s 时左侧扶梯口

及中间楼梯口能见度降为 10 m 以内,不利于人员疏散;243 s 时站厅层、站台层绝大部分区域能见度低于 10 m;327 s 时出入口能见度不满足疏散要求。

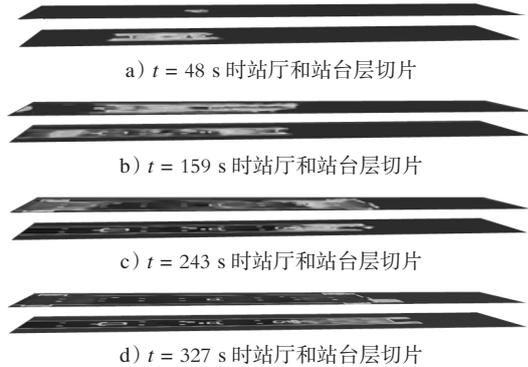


图 10 地铁站台火灾工况下切片能见度分布情况

3.5.4 火灾工况下 CO 的质量分数模拟

地铁站台火灾模拟中 CO 的质量分数云图分布如图 11 所示:在火灾发生的很短时间范围内,产生了大量有毒气体 CO;约在 350 s 时,站台层最左侧 CO 的质量分数较高,妨碍乘客进行疏散;600 s 内站厅层 CO 的质量分数相较于站台层较低,对疏散效率无较大影响。

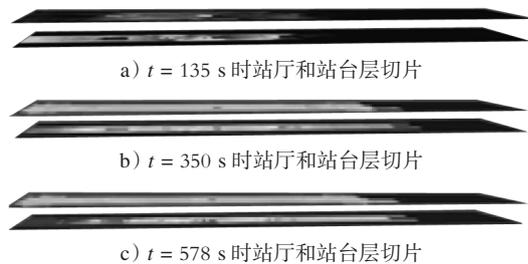


图 11 地铁站台火灾工况下切片 CO 的质量分数分布情况

通过对危险临界值以及火灾模拟过程中各关键位置能见度、温度等物理量的分析,整理出该火灾工况下站厅层和站台层各关键位置点的 t_{ASE} 如表 3 所示。

4 结语

本文将 BIM 技术有效地应用到地铁站台火灾应急管理;并基于 BIM 与 Pyrosim 火灾模拟软件相集成的技术,解决了两者之间的数据传输问题,实现了对 BIM 中材质信息的有效、快速、准确的提取,

表 3 地铁站台关键位置点的 t_{ASE}

位置	t_{ASE}
站台层左侧扶梯口	162
站台层中间楼梯口	159
站台层右侧楼梯口	197
站厅层左侧扶梯口	192
站厅层中间楼梯口	207
站厅层右侧楼梯口	244
出入口 A	343
出入口 B	388
出入口 C	359
出入口 D	391

提高了软件之间数据交流的效率,节省火灾模拟前的准备时间,优化了此环节原有的工作流程。在此基础上,选取了地铁站台的典型火灾工况进行模拟,并得到该工况下各关键位置的可用安全疏散时间。

参考文献

- [1] 崔铁军,马云东.基于 FDS 的施工地铁站台火灾模拟及疏散方案[J].自然灾害学报,2013,22(6):178.
- [2] 刘晨赟,韩雪峰,蒋军成.地铁站台火灾人员疏散时间评估方法探讨[J].城市轨道交通研究,2015,18(10):79.
- [3] 郭鄂.地铁站台火灾乘客应急疏散行为及能力研究[D].湘潭:湖南科技大学,2012.
- [4] 邢志祥,张莹,钱辉,等.地铁站台火灾和人员疏散仿真模拟技术发展的新思路[J].安全与环境工程,2018,25(3):130.
- [5] 陈绍宽,狄月,史荣丹,等.地铁站台火灾影响分析与人员疏散研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):245.
- [6] 田鑫.地铁站台火灾疏散研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [7] 李意.地铁站台火灾条件下疏散客流状态的仿真分析[D].成都:西南交通大学,2017.
- [8] 史聪灵,钟茂华,刘智成等.地铁高架车站火灾时人员疏散的性能化设计[J].中国安全生产科学技术,2007,3(4):11.
- [9] 王彦富,蒋军成.地铁火灾人员疏散的研究.中国安全科学学报,2007,17(7):26.
- [10] 王芳.地铁火灾事故人员应急救援安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [11] 陈立林,罗恩民,刘冠华.典型地铁站台火灾人员疏散模拟与评估[J].安全与环境工程,2015,22(4):123.
- [12] 奚苍.地铁站台公共区域火灾应急疏散[J].城市轨道交通研究,2016,19(4):93.
- [13] 张立茂,吴贤国,李博文,等.基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁站台人员疏散[J].科学技术与工程,2018,18(4):203.
- [14] 秦艳.基于 BIM 的地铁站台火灾安全疏散研究[D].武汉:华中科技大学,2016.

(收稿日期:2018-09-20)