

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-790-07

某机场捷运车站 综合交通体火灾自然排烟效果研究

张建刚¹ 黄潇² 余涛³ 刘通²

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610041;

2. 四川法斯特消防安全性能评估有限公司 成都 610036;

3. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 机场旅客捷运系统捷运车站综合交通体具有空间高大、上下贯通的特点, 其排烟系统无明确设计依据。采用 FDS 数值模拟计算软件, 对某综合交通体按中庭建筑属性采用自然排烟方案的烟气排除效果进行模拟计算。两种火灾场景下, 烟气温度、CO₂ 浓度、CO 浓度和能见度等指标在人员有效疏散时间内均能满足人员逃生的基本要求, 模拟结果可为类似贯通高大建筑空间排烟系统设置提供设计参考。

【关键词】 旅客捷运车站; 综合交通体; 高大空间; 火灾; 自然排烟

中图分类号 U25 文献标识码 A

Study on the Effect of Natural Smoke Exhaust for the Fire in a Comprehensive Transportation System of an Airport MRT Station

Zhang Jiangan¹ Huang Xiao² Yu Tao³ Liu Tong²

(1. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Chengdu, 610041;

2. Sichuan Fast Fire Safety Performance Evaluation Co., Chengdu, 610036;

3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The integrated traffic building of the airport MRT station has the characteristics of large space and space interaction, and its smoke exhaust system has no clear design basis. This paper uses FDS numerical simulation software to calculate the smoke removal effect of a comprehensive transportation building using a natural exhaust scheme based on the properties of the atrium building. Under two types of fire scenarios, indicators such as smoke temperature, CO₂ concentration, CO concentration and visibility can meet the basic requirements for personnel evacuation during the effective evacuation time. The simulation results can provide design references for smoke exhaust systems in similar large space buildings.

【Keywords】 Passenger Rapid Transit Station; Comprehensive transportation building; Large space; Fire; Natural smoke exhaust

0 引言

旅客捷运系统 (APM) 是运行于专用路权的轨道交通系统, 具备无人驾驶、中低运量等特点。近

些年在国内大型机场中逐渐引入, 作为机场内旅客或工作人员快速来往各航站楼或卫星厅的高效交通工具。一般设置旅客捷运系统的航站楼建筑规模

大, 捷运系统车站与航站楼的接驳形式多样, 本文中描述的某捷运车站综合交通体就是其中的一类特殊方式。

该综合交通体空间高大, 下部位于地下, 上部位于地上, 虽然具有采光性好等优点, 但同时带来防灾等方面难题^[1], 尤其是排烟系统的设计。对于地下或半地下建筑, 防排烟系统设计是整个防灾系统的核心, 良好的烟气控制是保障火灾发生时人员安全疏散的关键^[2-4]。部分学者^[5-7]针对地下建筑提出了防排烟策略及系统建议, 但针对机场综合体防排烟系统的研究较少。本文将结合机场综合交通体的空间特点, 依据《建筑防排烟系统设计标准》^[8]对中庭自然排烟的要求, 研究综合交通体的

自然排烟效果。

1 工程概况

1.1 建筑布置

该车站综合交通体位于重庆江北国际机场 T3A 站, 为土建预留车站, 土建主体工程已与航站楼主体实施到位。为优化旅客乘坐捷运的便捷体验, 在 T3A 航站楼幕墙外新增交通体, 其主要功能为供 T3B 到达旅客 (去往 T3A 的 L2 层) 和 T3B 出发旅客 (由 T3A 的 L3 层直达捷运站台) 使用, 交通体最高点离站台公共区地面约 28.7m, 交通体上部与航站楼 L2 层及 L3 层连通, 下部与 APM 车站站台公共区连通。交通体具体布置如图 1 和图 2 所示。

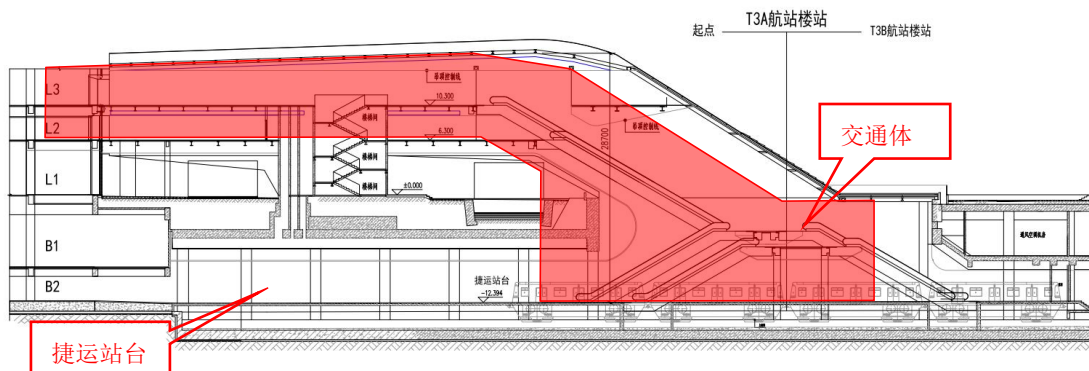


图 1 交通体横剖面图

Fig.1 Cross section of the traffic building



图 2 交通体鸟瞰效果图

Fig.2 Aerial view of the traffic building

1.2 建筑防火分隔设计

建筑防火分隔是研究防排烟系统的前置条件, 根据《民用机场航站楼设计防火规范》^[9], 当航站楼确需与城市公共交通设施连通时, 应在连通部位

设置间隔不小于 10.0m 的分隔空间, 并宜采用露天开敞的空间。为满足该条规范要求, 通过在 L3 层及 L2 层设置防火卷帘 (见图 3), 将航站楼与交通体进行防火分隔。

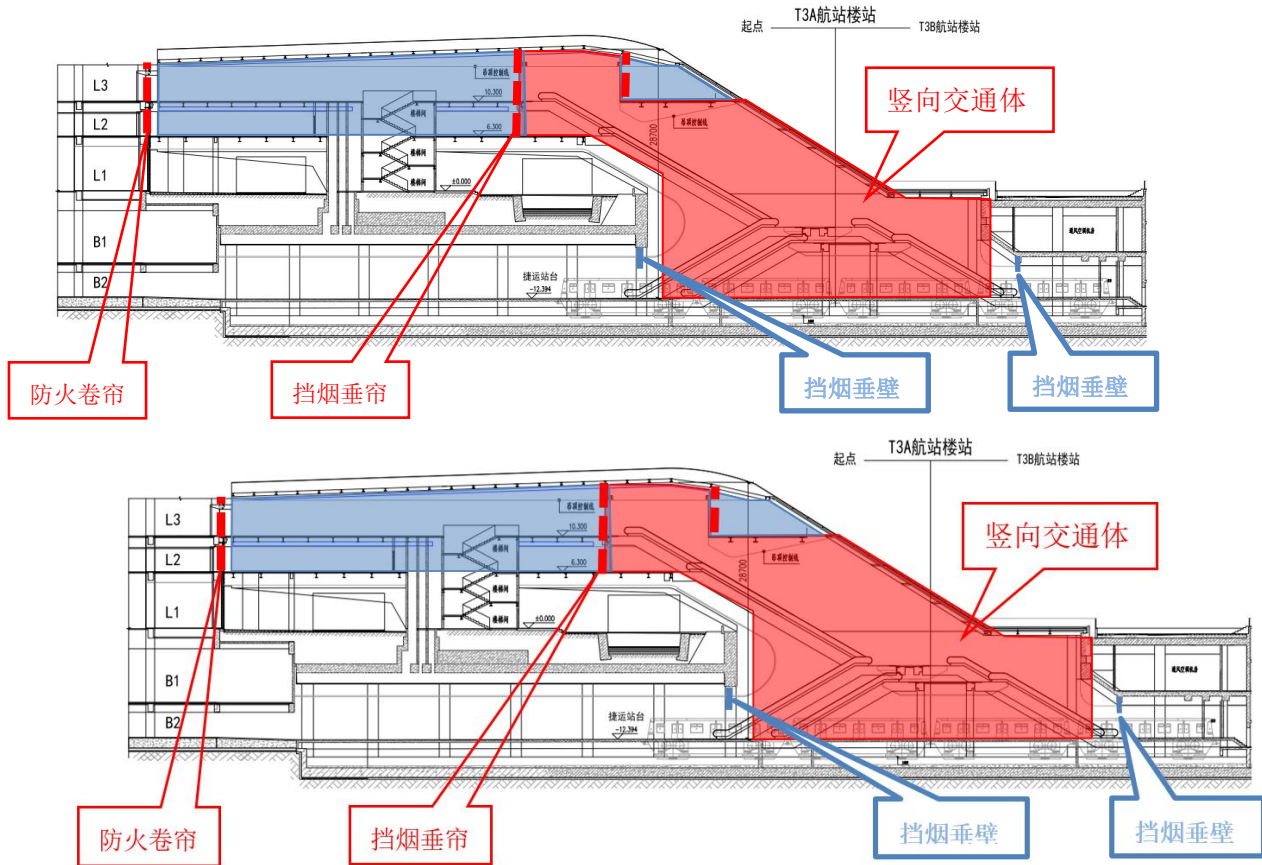


图 3 交通体防火分隔示意图

Fig.3 Schematic diagram of fire separation of the traffic building

1.3 防排烟系统设计方案

L2 层及 L3 层分隔空间，依据《建筑防烟排烟系统设计标准》^[8]分别划分防烟分区。采用自然排烟时自然排烟窗口的有效面积不应小于防烟分区面积的 10%^[9]；采用机械排烟时，每个防烟分区排烟量应按每平方米不小于 60m³/h 计算，且机械排烟设施应独立设置。

竖向交通体，最高点离站台公共区地面约 28.7m，上部与水平分隔空间连通，下部和站台公共区连通。针对该竖向交通体排烟设计提供以下两个方案：

方案 1—根据《建筑防烟排烟系统设计标准》^[8]要求，按多层空间考虑，竖向交通体连通 L2 和 L3 层分隔空间处设置活动挡烟垂壁（见图 3），垂壁降落高度满足最高楼层 L3 层最小清晰高度要求（距站台公共区地面 24.8m）。可按其他公共建筑、无喷淋考虑，选取火灾热释放速率 $Q=8\text{MW}$ ，按轴对称型烟羽流计算，如式（1）~（4）。

$$Z_1 = 0.166Qc^{\frac{2}{5}} \tag{1}$$

$$\text{当 } Z > Z_1 \text{ 时, } M_p = 0.071Qc^{\frac{1}{3}}Z^{\frac{5}{3}} + 0.0018Qc \tag{2}$$

$$\Delta T = KQc / M_p C_p \tag{3}$$

$$V = M_p T / \rho_0 T_0 \tag{4}$$

式中： Z_1 为火焰极限高度，m； Q_c 为热释放速率的对流部分，取 $0.7Q$ ，kW； M_p 为烟雨流质量流量，kg/s； V 为排烟量，m³/s。

通过式（1）~（4）计算，排烟量为 238m³/s，该排烟量非常大，既有条件无法满足，该方案不可行。

方案 2—竖向交通体连通 L2 和 L3 层水平分隔处均设置电动挡烟垂帘（火灾时降至楼面），竖向交通体形成竖向围合空间，类似民用建筑中庭^[10,11]形式。根据《建筑防烟排烟系统设计标准》^[8]，中庭排烟量 10.7 万 m³/h，自然排烟窗的风速不大于 0.5m/s，计算有效开启窗面积 60m²。

文献[12]中给出了有关中庭排烟设施的建議, 对于高度不超过 18m 的中庭, 可采用自然排烟, 且应在其屋顶设置自然排烟口。国内《高层民用建筑设计防火规范》[13]指出室内中庭净空高度超过 12m 时, 烟气上升可能出现“层化”现象, 不能采取可开启的高侧窗进行自然排烟。本项目中庭高度远超 18m, 采用自然排烟是否可行, 如可行, 自然窗如何设置等, 国内现行规范没有明确规定, 目前也没有成熟的项目经验可供参考。因此, 本文拟进一步通过 FDS 火灾模拟软件进行模拟论证分析。

1.4 自然排烟方案

上节中方案 2 将竖向交通体按中庭考虑, 按《建筑防烟排烟系统设计标准》[8]计算排烟窗面积不小于 60m^2 。文献[12]中提及不超过 18m 的中庭, 排烟窗应设于屋顶, 由于交通体造型需要, 无法全部满足在顶部开窗的条件。加之层高超过 18m, 火灾时烟雨流存在下沉可能, 结合建筑条件, 初步按交通体顶部总设置 75% 面积的可开启窗, 侧面总设置 25% 面积的可开启窗 (侧窗最低点距离站台面 13.8m), 具体设置如图 4 所示。

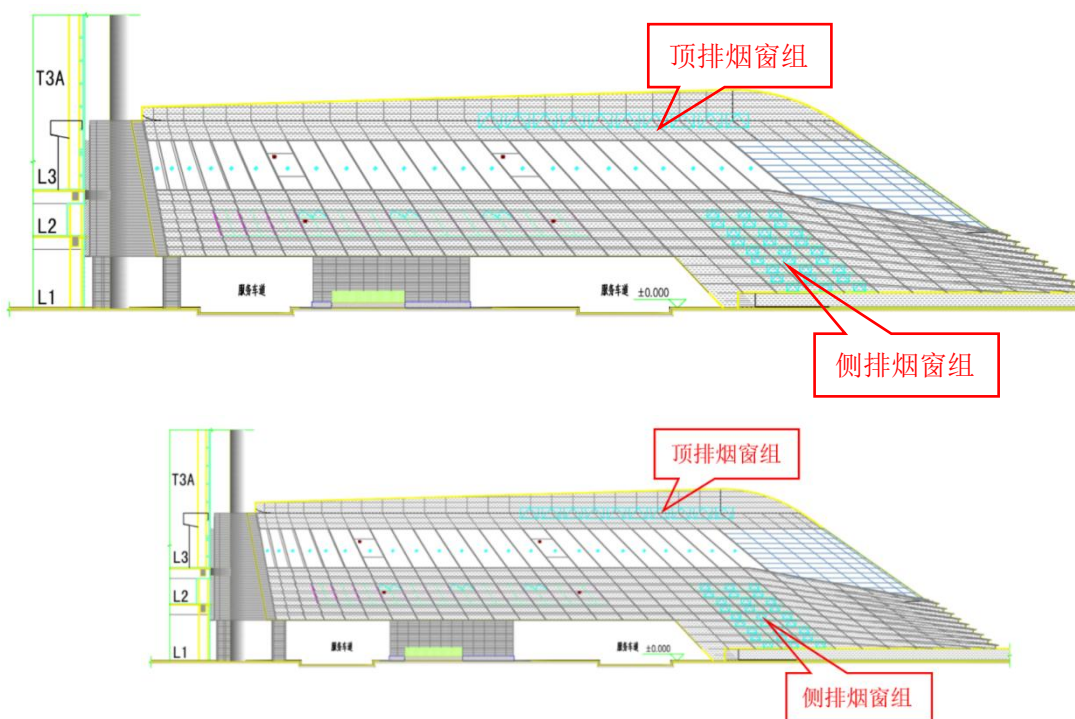


图 4 竖向交通体排烟窗设置

Fig.4 Vertical traffic building exhaust window distribution

2 数值计算模型

2.1 软件介绍

本文数值模拟计算采用的 FDS 软件是美国国家标准和技术研究所 NIST 开发的三维 CFD 模拟软件, 以数值方法求解一组描述热驱动的低速流动的 Navier-Stokes 方程, 通过大涡模拟 (Large Eddy Simulation, 简称 LES) 方法模拟烟气流动的具体细节, 具有较高的精度与计算效率。

2.2 火灾场景选择

火灾场景的确定应根据最不利的原则确定, 选择火灾风险较大的火灾场景作为设定火灾场景。本

次研究选择火灾场景如下:

火灾场景 A: 竖向交通体中庭投影下部站台公共区行李火灾。英国建筑研究公司 (BRE) 对行李火灾的研究结论: 在没有装设喷淋系统的地方, 载满行李小型手推车的火灾规模为 1.1MW 。但考虑到《建筑防烟排烟系统设计标准》[8]明确中庭的火灾规模为 4.0MW , 为验证中庭自然排烟有效, 本次模拟火灾规模按 4.0MW 考虑。起火点示意图如图 5 所示。

火灾场景 B: 竖向交通体中庭投影下部捷运车体火灾 (7.5MW), 该场景自动灭火系统失效, 轨

行区机械排烟和中庭自然排烟均有效，轨行区与站台公共区之间屏蔽门失效处于开启状态，用于考察

站台轨行区起火时的烟气蔓延情况。起火点示意图如图 5 所示。

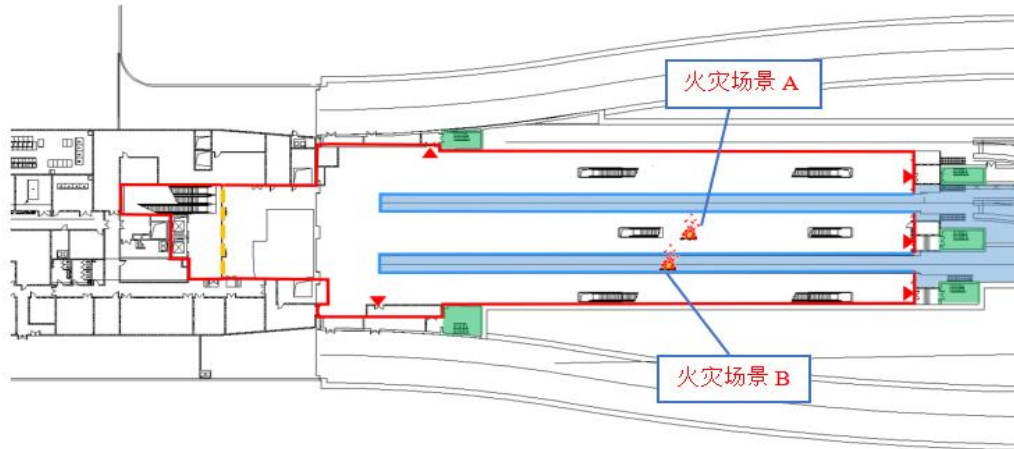


图 5 捷运站台火灾场景示意图

Fig.5 APM platform fire scenario

2.3 模拟参数和边界条件设置

采用 FDS 软件建立上述捷运站台火灾计算模型，模拟时间 1800s，网格尺寸为 0.5m，网格总数为 4608000，网格划分图如图 6 所示。火灾类型为 t^2 火灾，火灾增长系数为 0.044kW/s^2 。环境温度为

25℃，大气压力为 1 个标准大气压，不考虑环境风速的影响。

计算模型选用 (LES) 大涡耗散湍流模型。除防火门关闭外，其余各门均为正常使用情况下的开启状态。

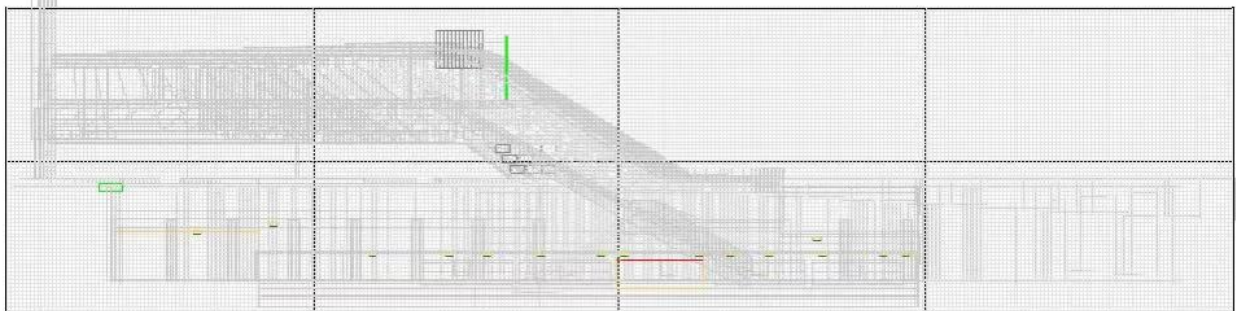


图 6 火灾模拟网格划分图

Fig.6 Fire simulation grid division diagram

3 危险判据

根据美国消防工程师协会 (SFPE) 《消防工程手

册》^[14]和澳大利亚《防火工程指南》^[15]相关研究，在人员疏散时，火灾烟气到达危险时的判据如表 1 所示。

表 1 火灾疏散安全判据标准

Table 1 Standard for evacuation safety criteria during fires

标准	特性界定
热烟层辐射热	热烟层在清晰高度以上，烟气温度低于 180℃
人员在烟气中疏散的温度	热烟层降到清晰高度以下，温度低于 60℃
能见度	热烟层降到清晰高度以下，光密度高于 0.1m^{-1} ，即 10m
一氧化碳浓度 (中毒)	热烟层降到清晰高度以下，浓度低于 500ppm
二氧化碳浓度 (窒息)	热烟层降到清晰高度以下，浓度低于 1% (体积百分比)

注：本项目交通体空间净高 29m，清晰高度为站台地面上方 4.5m。

4 结果及分析

对 2 个火灾场景下的烟气温度、CO₂ 和 CO 浓度分布、能见度进行模拟计算, 结果分析如下。

4.1 火灾场景 A

从烟气整体流动情况来看, 站台发生火灾后, 绝大部分烟气在浮力作用下进入交通体中庭空间, 仅少量烟气进入站台层周边空间。进入交通体中庭的烟气前期主要通过顶部排烟窗排至室外, 后期随着烟气在交通体内积聚、下沉, 烟气开始通过侧面排烟窗排至室外, 由于交通体中庭空间净高较高, 储烟空间充足, 整个模拟过程中, 烟气虽然有发生缓慢沉降, 但未降至影响站台层人员疏散的高度。另外, 虽然有少量烟气进入站台层周边空间, 但这些烟气通过站台机械排烟系统排至室外, 未发生烟气下沉影响人员疏散的情况, 交通体内烟气流动情况符合设计预期。

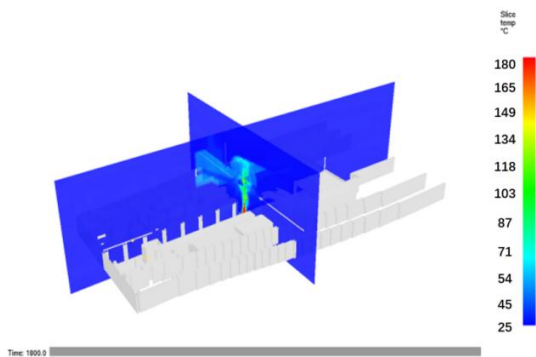


图 7 火灾场景 A 在 1800s 时的烟气温度分布图

Fig.7 Smoke temperature distribution in the 1800s for fire scenario A

如图 7 所示, 从烟气温度指标来看, 火灾发生后的 1800s 内, 交通体中庭空间清晰高度以上空间最高温度约为 120°C, 顶棚处约为 68°C, 未超过 180°C, 清晰高度以下空间温度约 30°C, 未超过 60°C, 说明热烟气温度不会对人体造成影响。

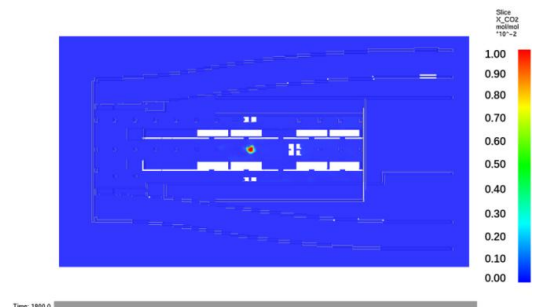


图 8 火灾场景 A 在 1800s 时的 CO₂ 浓度分布图

Fig.8 CO₂ concentration in the 1800s for fire scenario A

如图 8 所示, 从 CO₂ 体积百分比浓度指标来看, 火灾发生后的 1800s 内, 交通体中庭空间清晰高度处的 CO₂ 体积百分比浓度对比起火前无明显变化, 最高浓度约为 0.1%, 不超过 1%, 说明 CO₂ 体积百分比浓度不会对人体造成影响。

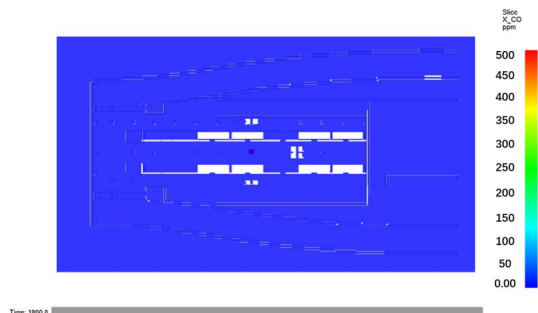


图 9 火灾场景 A 在 1800s 时的 CO 浓度分布图

Fig.9 CO concentration in the 1800s for fire scenario A

如图 9 所示, 从 CO 浓度指标来看, 火灾发生后的 1800s 内, 交通体中庭空间清晰高度处的 CO 浓度对比起火前无明显变化, 浓度接近于 0, 不超过 500ppm, 该场景 CO 浓度不会对人体造成影响。

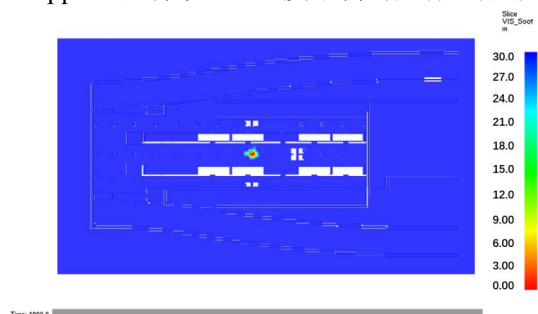


图 10 火灾场景 A 在 1800s 时的能见度分布图

Fig.10 Visibility profile in the 1800s for fire scenario A

如图 10 所示, 从能见度指标来看, 火灾发生后的 1800s 内, 交通体中庭空间清晰高度处的能见度对比起火前无明显变化, 能见度约为 29m, 未低于 10m, 该场景能见度不会对人员逃生造成影响。

4.2 火灾场景 B

本场景考察的是位于轨行区的列车发生火灾的情况, 从烟气流动情况来看, 由于轨行区与站台空间之间设置了屏蔽门, 且轨行区内设置了机械排烟系统, 列车发生火灾后, 大部分烟气直接通过轨顶排烟系统排至室外, 但由于火灾规模相对较大, 仍有部分烟气进入交通体中庭空间和站台层周边空间。经对比, 进入交通体中庭的火灾烟气相较于火灾场景 A 更少, 因此可以顺利通过顶部排烟窗和侧面排烟窗排至室外, 未在交通体中庭内部积蓄

下沉。进入站台层周边空间的烟气也由站台机械排烟系统顺利排出,均未发生烟气下沉影响人员疏散的情况,交通体内烟气流动情况符合设计预期。

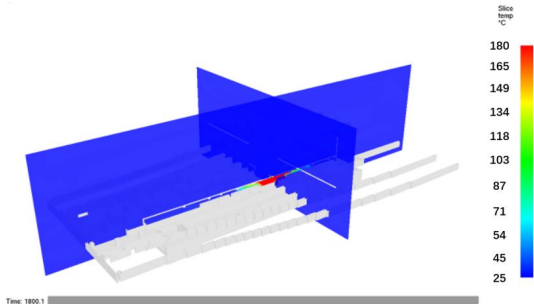


图 11 火灾场景 B 在 1800s 时的烟气温度分布图

Fig.11 Smoke temperature distribution in the 1800s for fire scenario A

如图 11 所示,从烟气温度指标来看,火灾发生后的 1800s 内,因仅有少量烟气进入交通体内,交通体内温度整体较低,中庭空间清晰高度以上空间最高温度约为 45°C,未超过 180°C,清晰高度以下空间温度约 30°C,未超过 60°C,说明热烟气温度不会对人体造成影响。

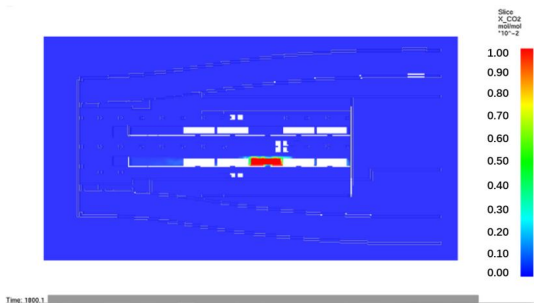


图 12 火灾场景 B 在 1800s 时的 CO₂ 浓度分布图

Fig.12 CO₂ concentration in the 1800s for fire scenario B

如图 12 所示,从 CO₂ 体积百分比浓度指标来看,火灾发生后的 1800s 内,交通体中庭空间清晰高度处的 CO₂ 体积百分比浓度对比起火前无明显变化,浓度接近于 0,不超过 1%,说明 CO₂ 体积百分比浓度不会对人体造成影响。

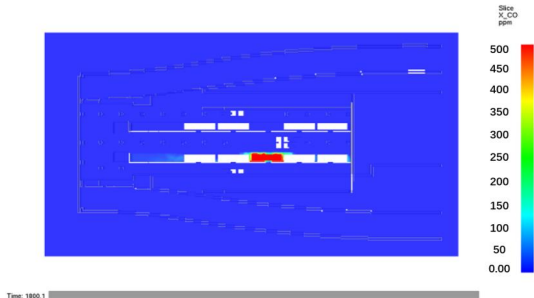


图 13 火灾场景 B 在 1800s 时的 CO 浓度分布图

Fig.13 CO concentration in the 1800s for fire scenario B

如图 13 所示,从 CO 浓度指标来看,火灾发生后的 1800s 内,交通体中庭空间清晰高度处的 CO 浓度对比起火前无明显变化,浓度接近于 0,不超过 500ppm,该场景 CO 浓度不会对人体造成影响。

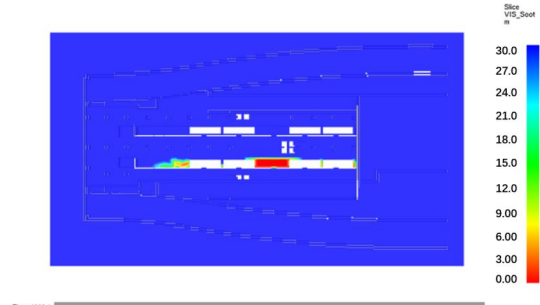


图 14 火灾场景 B 在 1800s 时的能见度分布图

Fig.14 Visibility profile in the 1800s for fire scenario B

如图 14 所示,从能见度指标来看,火灾发生后的 1800s 内,交通体中庭空间清晰高度处的能见度对比起火前无明显变化,能见度约为 30m,未低于 10m,该场景能见度不会对人员逃生造成影响。

5 结论

机场旅客捷运车站综合交通体排烟系统无明确设计依据,本文采用 FDS 数值模拟计算软件,对某综合交通体采用自然排烟方案的烟气排除效果进行模拟计算,得到以下结论:

(1) 站台层火灾烟气可以通过交通体中庭顶部排烟窗和侧面排烟窗顺利排至室外,不会在站台层发生大面积横向蔓延,亦不会沉降到影响站台层人员安全疏散的高度。

(2) 烟气温度、CO、CO₂、能见度指标均未达到影响站台层人员安全疏散的程度。

本文提出的机场捷运车站综合交通体自然排烟方案,达到了消防排烟设计的目标,可为今后类似工程提供设计参考。

参考文献:

- [1] 朱艳,刘方,蒲清平.大空间建筑消防安全评估[J].重庆建筑大学学报,2005,27(2):81-84.
- [2] 邱少辉.某超大型全地下高铁火车站防排烟系统设计[J].建筑技术开发,2016,43(10):4-6.
- [3] 冯炼,刘应清.地铁火灾烟气控制模式的数值模拟[J].地下空间,2002,22(1):61-64.

4 结论

针对地源热泵地埋管系统设计中传统水力计算方式效率较低的难题,基于 Python 语言设计开发了地埋管系统水力计算软件,并通过实际案例的测试计算,验证了软件在实际工程设计中的可行性。本文主要结论如下:

(1) 通过一系列优化算法,将大部分工作量交由软件完成,基本实现了水力计算自动化,大大提高了水力计算的效率。

(2) 针对某地源热泵地埋管系统进行案例计算分析,系统为主管同程、支管异程的形式,主管与支管分别进行水力计算。

(3) 每个支路 6 个地埋孔之间的阻力平衡通过增大支路干管的管径调节,并联环路的最大不平衡率降至 4.7%;不同支路之间的阻力平衡通过检查井中回水管路上的平衡阀调节,并联环路的最大不平衡率降至 4.5%。

(4) 室外地埋管系统的最大不平衡率仅为 5.5%,总阻力损失约为 12.3m·H₂O。

本文介绍的地埋管系统水力计算软件基本满足自动水力计算、水力平衡调节等需求,但在地埋管系统形式上仍然有所限制,并且在进行大型系统的计算时速度较慢,后续可进一步拓展与优化。

参考文献:

- [1] 徐建军.地埋管地源热泵系统的水力平衡与优化[D].济南:山东建筑大学,2013.
 - [2] 郭晨.暖通空调系统水力平衡调试方法研究[D].北京:北京工业大学,2016.
 - [3] 马玉婷,孙绍儒,陈江娜,等.应用 AutoCAD 自动绘制热负荷延续时间图[J].煤气与热力,2019,39(1):16-18.
 - [4] 顾叶环.基于 AutoCAD 二次开发的参数化绘图设计研究与应用[D].合肥:安徽建筑大学,2017.
 - [5] 刘昱航.基于 C#配电网规划设计辅助软件的开发[D].南昌:南昌大学,2018.
 - [6] 刘娜.利用 Python 语言实现集中监测 CAD 施工图辅助设计[J].铁路通信信号工程技术,2019,16(11):97-100.
 - [7] GB50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
 - [8] 陆耀庆.实用供热空调设计手册(第 2 版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:1984-1985.
 - [9] GB50366-2005,地源热泵系统工程技术规范(2009 年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
 - [10] 陶文玲,侯冬青.PyQt5 与 Qt 设计师在 GUI 开发中的应用[J].湖南邮电职业技术学院学报,2020,19(1):19-21.
 - [11] 陈帝尧,黄鲁江.一种计算机联锁机柜工程图纸的自动化生成方法[J].铁道通信信号,2020,56(9):26-28.
 - [12] 雍龙泉.非线性方程牛顿迭代法研究进展[J].数学的实践与认识,2021,51(15):240-249.
-
- (上接第 796 页)
- [4] Zhong M H, Fan W C. Air flow optimizing control research based on genetical algorithm during mine fire period [J]. Journal of Fire Sciences, 2003,21(2):131-153.
 - [5] 史一锋,殷全铭.地下建筑防排烟策略研究[J].消防界(电子版),2017(10):124-125.
 - [6] 田晓.地下建筑防排烟系统的设置和应用[J].建设科技,2017(16):84-85.
 - [7] 刘文辉.地下建筑防排烟系统设置问题探讨[J].武警学院学报,2016,32(8):63-65.
 - [8] GB 51251-2017,建筑防烟排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
 - [9] GB 51236-2017,民用机场航站楼设计防火规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
 - [10] GB/T 50504-2009,民用建筑设计术语标准[S].北京:中国计划出版社,2009.
 - [11] DG/TJ 08-88-2021,建筑防排烟系统设计标准[S].上海:同济大学出版社,2021.
 - [12] BS 5588-7- 1997, Fire precautions in the design, construction and use of buildings-Part 7: Code of practice for the incorporation of atria in buildings[S].
 - [13] GB 50045-95,高层民用建筑设计防火规范(2005 版)[S].北京:中国计划出版社,2005.
 - [14] SFPE Handbook Of Fire Protection Engineering[M]. The National Fire Protection, 2002.
 - [15] Fire Engineering Guidelines[M]. Fire Code Reform Center Limited, 1996.