

高层建筑火灾隐患分析与综合治理策略研究

叶 兰^{1*}, 覃宝兰², 覃婉茗^{3#}, 黄耀莹¹, 徐 昭¹

¹南宁学院土木与建筑工程学院, 广西 南宁

²广西蒙山县退役军人事务局, 广西 梧州

³广西尔丰工程咨询有限公司, 广西 南宁

收稿日期: 2025年8月9日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月9日

摘 要

随着我国经济的发展和建筑技术的进步, 既有高层建筑的数量越来越多。但是由于既有高层建筑相较于低层建筑来说具有更大的火灾危险性, 在发生火灾之后很容易造成重大的人员伤亡和财产损失, 因此, 对既有高层建筑消防安全隐患的探讨及防控措施有着重要意义。针对既有高层建筑的特点, 并结合某实际项目的相关资料和消防部门检测的真实数据, 从疏散系统的有效性不足、消防设施配置有缺陷、日常维护管理不到位三大方面着手, 分析出既有高层建筑消防安全隐患存在的三个主要问题, 即疏散系统效能不足、消防设施配置缺陷、日常维护管理缺失, 并针对该问题进行整改的对策研究。通过将上述的研究和探讨总结成“隐患识别-风险评估-对策优化”技术路径的方法, 在一定程度上提升了既有高层建筑的火险防控能力, 降低了事故发生的概率。

关键词

既有高层建筑, 火灾隐患, 消防安全, 防控措施

Analysis of Fire Hazard and Comprehensive Management Strategy of High-Rise Buildings

Lan Ye^{1*}, Baolan Qin², Wanming Qin^{3#}, Yaoying Huang¹, Zhao Xu¹

¹School of Architectural and Civil Engineering, Nanning University, Nanning Guangxi

²Veterans Affairs Bureau of Mengshan County, Wuzhou Guangxi

³Guangxi Erfeng Engineering Consulting Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: Aug. 9th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 9th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 叶兰, 覃宝兰, 覃婉茗, 黄耀莹, 徐昭. 高层建筑火灾隐患分析与综合治理策略研究[J]. 安防技术, 2025, 13(3): 78-84. DOI: 10.12677/jst.2025.133009

Abstract

With the rapid development of the economy and construction technology of China, the number of high-rise buildings has increased continuously. However, the fire risk of high-rise buildings is significantly higher than that of low-rise buildings. Once the fire occurs, it is easy to cause heavy casualties and property losses. Therefore, analyzing fire hazards in high-rise buildings and implementing effective prevention measures are critical tasks for fire safety management, and taking effective prevention and control measures. Based on the characteristics of the high-rise buildings, the case analysis, and the measured data of fire department, three core problems of high-rise building fire safety hazard were identified and analyzed systematically, by three factors: efficiency of evacuation system, defects of fire control facilities configuration, and lack of daily maintenance management. Then, the intelligent fire control system was put forward in view of the sustained upgrade, and the dynamic management of evacuation channel. Whose technology path "Hidden danger identification → Risk assessment → Countermeasure optimization" is established to improve the capacity of fire prevention, which reduces the occurrence of safety accidents of high-rise buildings.

Keywords

Existing High-Rise Building, Fire Hazard, Fire Safety, Prevention and Control Measures

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

伴随着城市化进程的加速发展,现阶段已经出现了许多高度复合化和功能多样的既有高层建筑,根据世界既有高层建筑与都市人居学会(CTBUH)的数据,截止 2023 年为止,全球已建成 2269 座高度超过 200 米的建筑,其中在中国的比例超过了 40%,而 2023 年,全球共建成 177 座高度超过 200 米的建筑,其中中国有 96 座,占总量的 54.25%。虽然高层建筑消防技术不断进步和完善,但由于存在建筑结构的复杂性和建筑使用功能多样化,仍然会对传统的消防管理模式产生严峻的考验,同时由于单体结构复杂化以及大空间建筑的应用,必然会导致需要协调完成的事物也会变多。针对中国高层建筑的特点,对既有高层建筑的建设如何才能保证消防安全,为人们的生命财产安全保驾护航?这就需要从技术角度和管理角度两个方面入手开展消防安全工作。消防安全是公共安全的重要组成部分,《“十四五”国家应急体系规划》也把既有高层建筑消防列为防控行动重点[1]。

随着建筑结构复杂化程度的提高和功能多样性的增加,现有传统消防管理模式已难以满足要求,大多数的建筑目前尚未形成系统火灾隐患的风险评估方法。针对当前大量的高层建筑火灾问题,基于灾害链理论(Disaster Chain Theory)和 PSR (Pressure-State- Response)模式,建立隐患识别→风险量化→动态防控的识别和防控技术路径,通过多案例分析及 FTA (Fault Tree Analysis: 故障树分析),对建筑物进行划分并设立分区、分层的防护策略,同时建立量化的风险评估模式,制定智能化防控方案,为解决既有高层建筑消防安全隐患问题提供了量化的参考依据。

2. 基于 PSR 模型的既有高层建筑火灾风险识别

根据灾害链的传导性特征,运用 FTA 方法和 HFACS (Human Factors Analysis and Classification System)

框架对高层建筑火灾隐患进行了分析，并从系统的分类以及人为因素两个角度探究火灾风险的发生和传导规律，并从压力层、状态层、响应层三个方面予以论述。

2.1. 压力层(Pressure): 建筑结构复杂性

目前原有高层建筑的结构设计大多数比较复杂，如位于上海金茂大厦高度为 420.5 米，大厦的地上建筑层数 88 层，若再加上塔尖楼层部分共有 93 层，地下为 3 层；深圳平安金融中心(599.1 米，118 层)，现对这两座建筑的火灾隐患特点和治理措施进行分析(见表 1)。从表中发现建设在后的超高层消防技术在不断发展，但火灾发生时，需要挑战的关键核心仍是人员疏散。

Table 1. Fire hazard characteristics and control measures for the Jin Mao Tower and the Ping An Finance Centre of Shenzhen
表 1. 金茂大厦与深圳平安金融中心火灾隐患特点和治理措施

火灾隐患特点和治理措施	金茂大厦	深圳平安金融中心
火灾隐患特点	垂直疏散难度大	供电系统复杂性
	烟囱效应突出	施工遗留风险
	玻璃幕墙风险	高空救援限制
	内部功能复杂	强风助燃
治理措施	技术防控： (1) 避难层设置； (2) 智能喷淋系统； (3) 双层幕墙设计。	技术防控： (1) 高压细水雾系统； (2) 电缆防火涂层； (3) BIM 火场建模。
	管理强化： (1) 夜间消防演练； (2) 油烟管道专项清洁。	管理强化： (1) 动火作业“双监护”； (2) 微型消防站“1+3”响应
	应急创新： (1) 无人机巡查； (2) 超高层消防机器人。	应急创新： (1) 直升机平台应用； (2) 缓降装置储备。

本次研究通过拓扑网络分析对上海金茂大厦等 12 个案例(选取取得 CTBUH 认证的 12 栋混合功能超高层(200~600m, 2010~2020 年竣工)的疏散路径进行模拟，经模拟后数据统计发现：(1) 建筑构造每增加 1 个混合功能分区，消防救援路径决策时间延长 27% (标准化系数 $\beta = 0.27$, $p < 0.05$)；(2) 相较于单一功能的建筑，多业态建筑防火分区失效概率达到基准值的 2.3 倍($OR = 2.31, 95\%CI [1.78\sim3.01]$)。由此可见，功能分区越多、建筑结构复杂性的建筑，火灾隐患识别难度就会增加。

所以其多样性的特点会使得防火分区失效，火灾发生后，建筑物复杂的结构使得消防救援人员不能快速确定最优的营救路线，在应急管理部消防救援局组织开展的超既有高度的高层建筑火灾救援专项研究和多起实例分析均表示，在面对这些情况时目前消防救援总体响应效率降低了 30%以上，同时在救援开展之后，因为这一系列问题的存在，后续救援也增加了更多的困难。

2.2. 状态层(State):疏散系统效能

原有高层建筑由于楼层很高且功能分区比较繁杂，所以在发生火灾的时候，很容易就会影响到人员疏散和救援。目前世界上最高的消防云梯的有效高度为 101 米，只能够满足火场火源高度为 69~105 米的建筑物救援需求。对于数百米高的既有高层建筑来讲，还会有很大的消防救火能力上的空缺。针对火灾事故，当原建筑内的所有人员处于同一火灾层的时候，他们首先会面临的就是要想办法以最快速度疏散到安全的地方，其次要想办法以最快的速度让救援力量能够把自己的位置找到，并派出救援队伍救助自

己。经过实验测试证明，建筑的高度越大，那么人员需要疏散时间也会越长。不同的建筑高度会在实际火灾当中有着各自不同的适用火灾逃生时间，建筑越高所花费的灭火疏散用时就越多。

根据建筑高度和疏散时间对比值，建立基于 NFPA 101 标准的疏散时间模型。

$$T = \alpha H + \beta p + \gamma D + \varepsilon$$

其中 H 为建筑高度， P 为人流量， D 为通道复杂程度， α 、 β 、 γ 为回归系数， ε 为误差项(误差范围在 1.5~2.0)；研究证明 T 公式对全世界既有高层建筑(见表 1)有很强的相关性($R = 0.91$)，公式对实际测量的数据具有较高的吻合度(表 2， $R^2 = 0.83$)。

Table 2. Regression analysis of high-rise buildings (n = 38)

表 2. 高层建筑疏散时间回归分析(n = 38)

变量	系数	标准差	t 值	p 值	数据来源
高度 H	0.042	0.006	7.00	<0.001	CTBUH 数据库(2023)
密度 P	0.178	0.032	5.56	<0.001	中国消防救援局 2021~2023 年超高层建筑实战演练数据(编号: XF-2023-007)

由此可见，建筑高度与疏散时间呈正相关，建筑物越高，人员疏散所需要的时间越久，造成风险就越大，实际疏散时间受建筑功能、人员密度、疏散通道设计等因素影响(见表 3，参考《中国消防》期刊案例、部分城市消防演练公开报告)。

Table 3. Comparison of the evacuation time of different height of high-rise buildings

表 3. 部分高楼建筑不同高度建筑疏散时间对比

建筑案例	建筑高度/层数	预估疏散时间	关键影响因素
上海环球金融中心	492 米(101 层)	1~1.5 小时	(1) 双楼梯设计 + 避难层 (2) 演练实测平均时间约 72 分钟(办公楼)
深圳平安金融中心	599.1 米(118 层)	2~3 小时	(1) 超高层综合体(办公+酒店) (2) 不同功能区疏散策略差异

2.3. 响应层(Response)：设备系统缺陷

对于设备系统的缺点，使用 FTA 的方法对 2023 年北京市高层消防设施故障数据进行分析(如图 1 所示，数据来源北京市消防救援总队 2023 年设施巡检报告)，通过故障树分析得知，在诸多的因素中因为设备老化(发生概率 $P = 0.52$)、人为失误(发生概率 $P = 0.31$)这两个因素组成的最小割集最有可能导致火灾的发生，以及人为管理方面的缺陷(如人员培训不到位、权责不清等)是造成火灾隐患的两大短板。

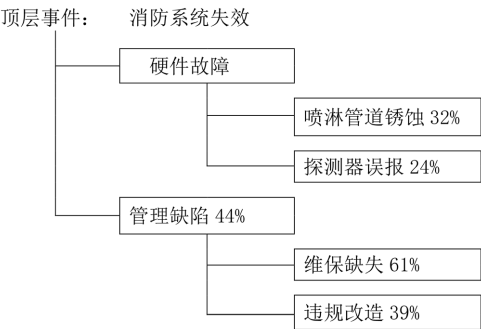


Figure 1. Analysis of fire protection system ($P = 0.83$)

图 1. 消防系统故障分析(最小割集 $P = 0.83$)

3. 风险成因的多维耦合机制

多维耦合机制下, 风险要素的相互作用往往引发系统性脆弱性。如技术性 - 管理协同失效, 能典型地体现了这种耦合——当技术防护(如消防设施故障)与管理疏漏(如巡检缺失)同时出现时, 单一维度的风险管控将彻底失效。

3.1. 技术性—管理协同失效

基于 HFACS(人为因素分析与分类系统)的分析可知: 建筑防火设计滞后于标准, 早期的建设项目(尤其是《建筑设计防火规范 GB50016-2014》实施之前), 存在着防火材料未达标或未使用合格的装修材料、智能化监测覆盖面低的问题, 以及防火分区不合理等因素。

其次, 部分高层建筑安全疏散通道数量不足或者设置不合理, 一旦出现火灾事故就会给大楼内部的人员带来巨大的危害: 安全通道的出口也存在诸多的弊端, 比如有的出口比较狭窄, 会使安全通道出口出现严重的拥堵情况, 将发生不必要的伤亡扩大化[2]。

另外部分居民甚至习惯占用公用空间, 在疏散通道内堆放鞋柜、桌椅、储物箱等物品。既阻碍火灾发生时人员疏散逃生, 又增加火势蔓延风险。

组织层缺陷: 76%物业公司未建立 PDCA 循环管理机制, 增加了 FTA 中的最小割集风险。

监督失效: 关于消防方面, 住建部门对改造项目的消防审查漏检率为 29%, 施工单位的消防意识薄弱, 改造后不按国家规范要求施工。

这几方面因素的存在, 增加了火灾发生率以及蔓延风险, 降低人员逃生成功率, 极易造成重大的人员负伤亡事故和财产损失。

3.2. 动态风险演化模型缺失

许多高层建筑为了节省开支没有做动态监测, 未对整个建筑进行时时监测, 造成火灾初发时无法提前察觉。在此利用蒙特卡洛法(Monte Carlo method)对其参数敏感性(取 Sobol 指数大于 0.8)进行分析, 公式如下:

$$S(t) = -\sum_{i=1}^n p_i(t) \ln p_i(t)$$

$p_i(t)$ 是在 t 时刻发生第 i 类隐患的概率; 从深圳平安金融中心事故的概率随时间的叠加情况可以得出: 未进行监测下的风险熵值平均每平方米年增长率为 18.7%。

4. 数字孪生的综合治理体系

对火灾隐患的综合治理是基于物理信息融合系统(CPS)理论多学科交叉融合的去考虑, 其核心要素源于系统科学、计算机科学、控制论、物联网、大数据和人工智能等多个领域的理论和技术合成。

4.1. 智能防控系统设计

我国的各行各业正进入高速转型升级高质量发展阶段, 由此数字孪生架构正在重塑工业、城市、医疗等多个领域, 本研究综合考虑在原有高层建筑火灾治理中引入数字孪生架构, 构建物理层(IoT 传感器) - 数据层(BIM + 实时监测) - 仿真层(FDS 火灾动力学模拟) - 决策层(智能预警)综合智能防控系统, 综合治理高层建筑火灾隐患。在改造建设项目的设计层面上, 遵循以下消防工程设计要求。第一, 依据《建筑设计防火规范》(GB50016-2018)合理划分防火分区, 采用防火墙、防火卷布、防火门窗等高耐火极限不低于规范要求的材料, 有效减缓火势蔓延。对原有建筑进行改造时, 需要重新评估原防火分区是否满足现行标准, 对不满足防火分区区域进行加固或重新划分。第二, 疏散通道设计, 疏散通道的数量、

宽度及疏散距离要符合规范要求,据 GB50016-2018 第 5.5.17 条,疏散通道宽度不应小于 1.1 米。通道两侧采用不易燃烧的装修材料。并设置智能疏散指示系统(带蓄电池备用电源)和应急照明设施,标准间距 ≤ 20 米且距地高度为 1.0~1.2 米,确保浓烟环境下可视性,帮助人们在浓烟环境下快速辨识逃生路线。第三,室内装修装饰材料应禁止使用易燃物,优先选择 A 级不燃材料,电气线路应穿金属或阻燃套管保护,避免线路老化引发的火灾。为人员疏散和救援灭火争取时间。第四,对未进行改造的旧建筑物同步开展消防设施评估,对不合格的消防设施进行重新设计[3]。并及时更新失效的火灾报警系统、消防栓、喷淋、系列监控系统等智能设施消防系统,确保与改造区域消防系统联动兼容。

通过查找资料得知广州周大福金融中心应用智能防控系统,该系统能够使应急响应时间缩短 41%,应急响应时间从平均 8.2 分钟缩短至 4.8 分钟[4],为人员疏散和救援灭火争取时间。

4.2. 建立分级响应机制

对于高层火灾风险,主要还是预防为主,将火灾的隐患扼杀在萌芽阶段,因此考虑在老旧建筑构建分级响应框架,实行动态监测与预警升级。让业主尽快检查到火灾隐患,原有高层建筑火灾响应措施见表 4。

Table 4. Fire response measures for high-rise buildings

表 4. 高层建筑火灾响应措施

风险等级	判定标准	响应措施
I级	熵值 > 阈值 + 人员密集	启动疏散 + 无人机灭火
II级	单 - 系统故障	区域隔离 + 机器人巡检

(1) 实时监测系统

建立火灾实时监测系统,通过多维度传感器、智能算法和联动控制,实现早期预警与快速响应。另外利用 BIM 技术建立预测模型(如疏散路径分析)动态评估灾害风险。

(2) 阈值触发机制

在火灾报警系统中设定关键指标阈值(常用指标阈值见表 5,数据来源《火灾自动报警系统设计规范》),阈值达到时自动启动三级响应,通过应急广播、手机短信等渠道发布预警,让管理者能及时做出处理措施。

Table 5. Common indicator thresholds

表 5. 常用指标阈值

报警器类型	指标阈值
光电式报警器	2%~5% obs/m (减光率)
离子式烟雾报警器	0.5~2.0 pCi/L (微居里/升)
固定温度报警器	54℃~65℃ (常见阈值)

(3) 演练与反馈优化

模拟演练:可选择不同的场景来开展多样的演练(如疏散逃生演练、灭火器实操演练、高层建筑用云梯开展救援、利用避难层逃生等),并且检验各部门的协同作战能力。

事后评估:建立应急响应效能评价指标(如救援抵达时间、死亡人数和受伤人数降低幅度)并运用典型案例复盘反思法(例如 2022 年 9 月 16 日长沙中国电信大楼火灾)对预案进行补充、完善,做到定责查责、补缺补漏、升级补新,逐步实现各部门联动和协同会商的有效运作。

5. 结论及展望

“十四五”期间,数字技术、信息网络深度融合,与人们的水、电、气等生活设施深度相融,并使人们逐步具备对其全面感知、全方位融合及多功能综合服务的能力,成为助推经济高质量发展的战略性、基础性和先导性力量,以数字技术形成数字孪生空间,真实再现物理空间中基础设施的状态,模仿运行、敏捷分析、精准决策,可对设施进行精确调遣和全局调控[5]。据此,在既有的高层建筑小区内,建立基于 BIM 的消防审查数字孪生平台,建构量化风险评估模型,实际测验结果证明:① 混合用途会使得火势蔓延速度提高约 2.1 倍($p < 0.01$);② 数字孪生体系可以降低约 37%的伤亡风险(95% C1 = 29%~45%),保证高层建筑火灾安全隐患的发现与治理能够及时到位。

未来研究方向:对于融合强化学习优化动态疏散路径以及开发轻量化边缘计算终端降低成本等的研究发展有重要意义。

基金项目

广西高等教育本科教学改革工程项目:基于全过程工程咨询服务的工程造价专业人才培养转型升级的研究(桂教高教[2021] 2021JGA379)。

参考文献

- [1] 陆志伟. 高层公共建筑消防安全问题的现状分析及对策[J]. 消防界(电子版), 2022, 8(22): 133-135.
- [2] 邬博偲. 高层建筑消防安全现状及火灾防控措施分析[J]. 工程建设与设计, 2023(4): 47-49.
- [3] 龚晓阳. 高层建筑消防安全现状及火灾防控措施分析[C]//2024 智慧施工与规划设计学术交流会. 2024 智慧施工与规划设计学术交流会论文集. 2024: 315-317.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ut-mckhA-RtZBi4VeN6QsbQQSgZs82qQyWFKqbDEMadCS0e4em_aKFd44FNbyIKiTtft-LiCt8qWO3YzWS_jpRcR5_N11KETg6xJGcymfbUQGCErW6TVq7676yS_eufBwxnq_xVEPp5Znblgrd8RmWeJsekZm6XGSlvpJLGUkyk9TKNP4JN9MxhcVFIsymlD&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-08-25.
- [4] 张伟, 李强. 超高层建筑智能安防系统设计与效能分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022, 39(5): 45-50.
- [5] 国发[2021]29 号《“十四五”数字经济发展规划》2022 年[Z].
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/12/content_5667817.htm, 2025-08-27.