

DOI: 10.7672/sgjs2025200060

基于物联网的在建超高层建筑火灾防控技术*

齐从月¹, 谭清华¹, 廖 继²

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 中建三局第三建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 针对在建超高层建筑火灾监测滞后、信息孤岛和应急响应不及时的问题, 提出基于物联网的火灾监测与智能防控方案。构建 3 层技术架构的火灾自动预警系统, 集成多源传感器网络, 并利用无线通信与云端处理实现数据实时传输与分析。开发多传感器数据融合算法的预警平台, 支持实时监测、多通道报警和智能运维。对深圳罗湖某超高层建筑项目进行试验研究, 结果表明, 系统在无遮挡条件下火灾预警系统通信距离达 75m、遮挡条件下达 20m, 报警-喷淋系统联动迅速可靠。该研究验证了该技术在火灾防控方面具有实时性、准确性与协同性, 为在建超高层建筑提供全面消防安全保障。

[关键词] 高层建筑; 物联网; 火灾防控; 智能预警; 模拟

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0060-05

Fire Prevention and Control Technology for Super High-rise Buildings Under Construction Based on the Internet of Things

QI Congyue¹, TAN Qinghua¹, LIAO Ji²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to solve the problems of lagging fire monitoring, information islands and untimely emergency response in super high-rise buildings under construction, a fire monitoring and intelligent prevention and control scheme based on Internet of Things is proposed. A three-layer technical architecture is built for the automatic fire early warning system, which integrates multi-source sensor networks, and uses wireless communication and cloud processing to achieve real-time data transmission and analysis. An early warning platform with multi-sensor data fusion algorithm is developed to support real-time monitoring, multi-channel alarm, and intelligent operation and maintenance. The test results show that the communication distance of the fire early warning system is 75m and 20m under the unshielded condition, and the alarm-sprinkler system linkage is fast and reliable. This study verifies that the technology has real-time, accurate and collaborative fire prevention and control, and provides comprehensive fire safety guarantee for super high-rise buildings under construction.

Keywords: tall buildings; Internet of Things; fire prevention and control; intelligent early warning; simulation

0 引言

近年来,随着城市空间集约化和立体化发展的不断推进,超高层建筑已成为现代城市建设的重要标志^[1]。据 CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) 统计,截至 2024 年,全球已建成 200m

及以上超高层建筑 2 433 座、300m 及以上建筑 241 座,并且仍有 477 座超高层建筑项目正在建设中。超高层建筑因体量大、施工复杂、周期长,施工现场呈现可燃物堆积、明火作业频繁及消防管理薄弱等问题^[2-3],导致施工期火灾风险显著增加。并且,受“烟囱效应”及风压影响^[4],超高层建筑火灾蔓延速度快、扑救难度大,极易造成重大人员伤亡和经济损失。

随着物联网、大数据及人工智能等技术的迅速

* 杭州市建设科研项目:在建超高层建筑火灾风险评估模型与防控方法研究;中建三局第三建设工程有限责任公司课题:超高层建筑火灾风险防控综合技术(CSCEC3B3-2023-13)

[作者简介] 齐从月,正高级工程师,E-mail:cscecqcy@vip.qq.com

[收稿日期] 2025-06-23

发展,射频识别、红外感应器、定位系统、激光扫描仪等信息传感设备与互联网的结合,进行信息交换、通信和储存的同时,实现了火灾风险源智能化识别、分析、定位、监控和管理^[5-6]。目前,这些技术在建筑消防安全管理中的应用日益深入并取得了显著成效^[7]。但现有研究多集中于运维期的火灾管理,针对施工阶段的研究较少。本文旨在构建一套基于物联网的火灾自动预警系统,开发火灾预警平台,对超高层建筑施工阶段的火灾风险源实时监控,进行预警、防控,以保障生命财产安全。

1 火灾自动预警系统设计

超高层建筑在建期的火灾自动预警系统整体架构设计如图 1 所示。该系统由火灾触发装置、预警装置、联动输出装置及辅助功能模块组成,融合互联网与物联网技术,构建了集技术防控、实时监测与多方协同管理于一体的多维火灾预警体系,可实现火灾隐患的早期识别、及时报警与精准干预。

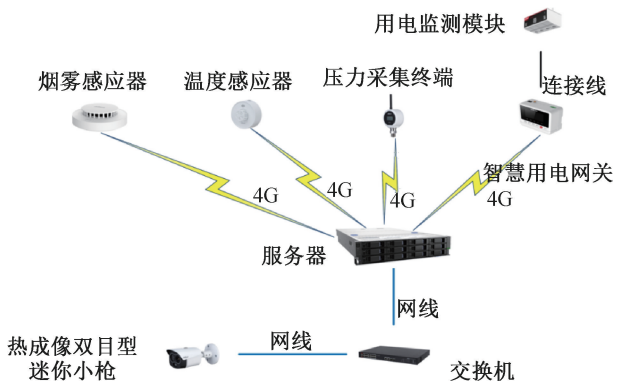


图 1 火灾自动预警系统整体架构设计

Fig. 1 Overall architecture design of fire automatic early warning system

1.1 系统技术架构设计

该系统采用感知层、网络层与应用层,通过无线通信技术实现传感设备数据的实时采集与云端传输。其中,感知层负责火灾自动报警与消防设施状态监测,结合热成像、声光报警、压力与液位传感器等设备,实现火源、消防水系统及灭火设备的实时监控与可视化管理。网络层采用 LoRa 与 NB-IoT 等通信协议构建稳定的数据传输链路,并引入定位技术,实现人员与设备的动态追踪,增强应急指挥的精准性。应用层通过本地数据中心与云平台联动,结合定制 APP 与电子地图,实现消防设施状态、报警信息及人员定位的集中管理与可视化展示,推动消防管理从经验驱动向数据驱动转变,提高火灾防控的科学性与实效性。

1.2 系统硬件结构设计

系统采用多传感器融合策略,构建了由感温、感烟探测器及电气监测设备组成的复合监测网络,通过关键参数的耦合分析,实现对火灾初期特别是阴燃阶段的精准识别与快速预警。系统集成热成像摄像头的视频监控功能,通过有线网络(网线+交换机)将高质量视频信号传输至中央服务器,进行重点区域可视化监控与智能分析。同时,感温、感烟探测器及电气监测设备与水管压力采集终端采用分布式部署,通过无线通信网络实时上传数据至云端平台。在平台统一处理下,各类数据进行协同分析,实现火灾风险的智能诊断与分级预警。该硬件架构可提升系统的多源信息融合能力,并为快速响应与高效联动提供技术支持。

1.3 系统协同管理设计

火灾自动预警系统通过预警平台与服务器的数据对接,实时获取前端传感设备采集的火灾信息,并通过 PC 端可视化界面实现人机交互。系统一旦检测到火灾隐患或确认火警,自动触发多级报警机制,并即时通知现场管理人员,确保高效应急响应。

2 火灾预警平台

为实现多源火灾探测系统的协同预警功能,构建了基于多传感器数据融合的火灾预警平台,如图 2 所示。该平台接入多种火灾探测器,并采用分层数据融合架构,以解决多源数据协同处理问题。通过数据预处理、综合分析决策研判,实现施工现场环境的精准判断,最大限度地减少误报误判,确保火灾风险的早期识别与精准干预。



图 2 火灾预警平台

Fig. 2 Fire early warning platform

该火灾预警平台基于物联网与大数据分析技术,集成多源传感器网络、云端处理与移动终端应用,主要包括如下功能。

1) 实时监测与视频联动。平台通过视频监控系统对施工现场关键区域(如物料区、消防通道、安全出口等)进行 24h 可视化监控,并接入感烟探测

器等前端设备,实时接收探测器状态,如图 3 所示。当探测器触发报警时,平台自动调用周边视频复核,提升预警准确性。



图 3 实时监控画面
Fig. 3 Real-time monitoring screen

2) 多端报警推送与精准定位。平台支持 Web 端与移动端同步推送报警信息,用户可远程查看现场视频与历史录像。结合施工楼层图,平台精确定位报警点并实时更新地理坐标,通过声光报警与移动推送双重机制确保责任人员及时响应。

3) 设备运维与智能分析。平台持续监控无线感烟与感温设备运行状态(见图 4),利用设备运行数据(包括设备型号、安装位置、电池电量等参数)自动识别设备故障并推送维护预警,保障设备的有效运行。基于火警信息、空间位置、时间序列及触发频次等数据,平台进行智能分析并生成多维报表(见图 5),支持历史数据查询,为火灾溯源提供标准化数据支撑。

4) 移动互联与闭环管理。平台提供 24h 移动互联监管服务,支持远程查看设备状态,实现火灾

隐患早发现、快处置。平台报警时,巡查人员可通过 APP 实时查看报警点位,进行拍照取证和警情复核,形成闭环管理。

3 火灾自动预警系统的示范应用

为验证火灾自动预警系统的实用性与有效性,在深圳罗湖某超高层项目中开展了示范应用,BIM 模型如图 6 所示。该项目在施工阶段,爬模区域模板作业层堆积大量可燃材料,且位于钢筋绑扎层下方,电焊作业产生的高温焊渣易引发火灾,加之通风良好,火势蔓延风险较高。因此,在该施工现场布设火灾探测设备和通信网络,并开展预警模拟试验。

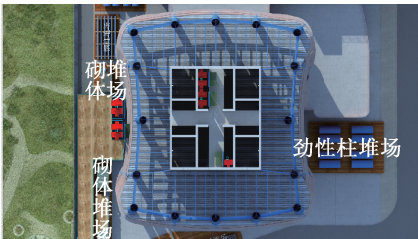


图 6 项目 BIM 模型
Fig. 6 BIM model of the project

3.1 探测设备与通信网络布设

为确保火灾自动预警系统在复杂施工场景下的有效运行,需合理规划探测设备布设与通信网络架构。火灾探测设备主要布设于爬模区域模板作业层,随爬模平台升降,避免频繁迁移,确保监测范围动态更新(见图 7a)。布设包括:模板作业层板顶部安装感温、感烟探测器;区域边缘布置热成像测



图 4 预警平台系统维护
Fig. 4 Maintenance of early warning platform system



图 5 火警数据智能分析
Fig. 5 Intelligent analysis of fire alarm data

温型双目摄像头进行温度监测;关键区域增设感光探测器,通过光谱分析识别焊接、切割及吸烟等异常光源。针对超高层建筑施工中的电气火灾风险,在密集作业区域配置智慧用电一体机、电流互感器及 NTC 测温传感器(见图 7b),实时监测电压、电流等关键参数,实现对过温、过压、过载、漏电及故障电弧等电气隐患的独立识别。同时,该设备具备电能质量分析及断电续航功能,保障高负荷工况下电气系统安全运行。另外,为实现消防供水系统在线监控,系统在管网末端安装智能压力采集终端,利用高精度扩散硅传感器和 NB-IoT 技术实时监测水压。考虑到超高层建筑施工中空间受限及信号衰减,基于无线传感器网络(WSN)架构,结合多跳中继与多协议协同机制,构建了高可靠性、全覆盖的专用通信网络。实现 WiFi,Bluetooth,ZigBee 等短距离通信与 LoRa,SigFox,NB-IoT 等低功耗广域网技术的互联互通,确保数据传输稳定,为火灾预警提供可靠通信保障。

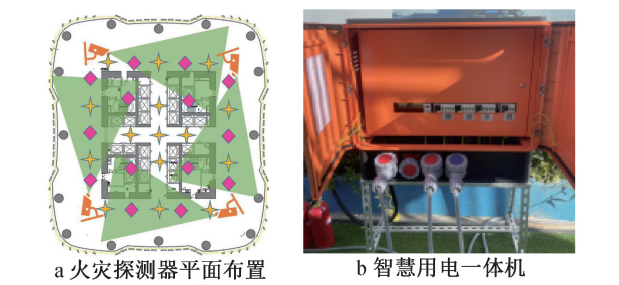


图 7 火灾预警系统设备布设

Fig. 7 Layout of fire early warning system equipment

3.2 火灾自动预警系统模拟试验

为全面验证火灾自动预警系统在实际场景下的性能与可靠性,开展预警系统模拟试验,测试对象包括感温、感烟探测器及热成像测温型双目摄像头,重点评估其响应时间、探测范围及与预警平台的兼容性。同时,针对无线通信网络的极限覆盖能力进行稳定性测试,为系统工程化应用提供技术支



图 8 感温、感烟探测器报警

Fig. 8 Alarm of temperature and smoke detectors

撑与参数依据。

3.2.1 监测设备自动预警模拟试验

试验选取施工现场建筑标准层作为测试场地,确保环境空旷、无气流干扰,并维持室内温湿度相对稳定,避免恶劣气象条件对试验结果产生干扰。在试验过程中,所有监测设备均完成预校准,确认运行状态正常、通信网络稳定。

1)感温、感烟探测器模拟试验。将感温、感烟探测器安装于距地面 1.5m 处,采用可控点火源引燃可燃物。在起始阶段,燃烧释放大烟雾,触发感烟探测器发出报警信号;随后,火势增强使周围温度升高,触发感温探测器发出高温报警。全过程由预警平台实时接收并可视化展示,如图 8 所示。

2)热成像测温型双目摄像头。热成像测温型双目摄像头基于红外热辐射感知技术,能识别高温作业(如电焊、切割)及违规吸烟等火灾风险行为,具备明火初期的报警能力。试验设置 2 类典型场景:吸烟行为与电焊作业。设备实时传输图像至预警平台,如图 9a,9b 所示。当设备识别出这类异常热源时,平台立即发出报警提示并记录事件信息(见图 9c,9d)。

3)智能压力采集终端。为实现对消防供水系统水压的动态监测,系统在水管末端安装智能压力采集终端并进行实测,如图 10 所示,终端采集水压值稳定在 0.4MPa(>0.15MPa),符合规范要求,可确保供水系统在火灾中的可靠响应。

3.2.2 监测设备预警响应时间试验

选用感温、感烟探测器和热成像测温型双目摄像头,对干燥木材、纸张、密目网及挤塑聚苯板 4 种易燃材料分别进行 15 次可控燃烧试验,记录各设备报警响应时间,结果如表 1 所示。试验表明,热成像测温型双目摄像头响应最快,平均为 1.29s,感烟探测器次之,平均为 3.80s,而感温探测器最慢,平均为 5.32s。3 类设备均未出现误报警,表现出较高的



c 系统反馈页面

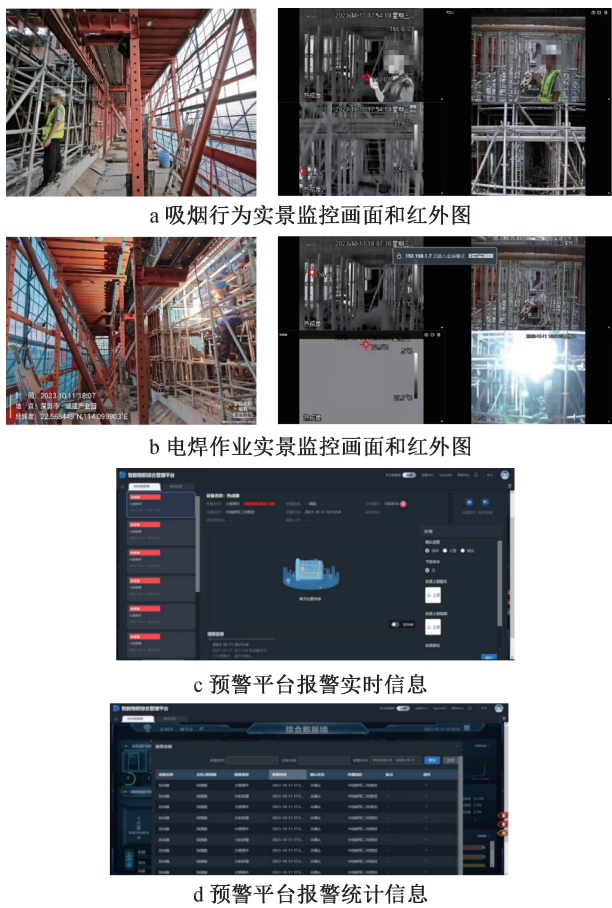


图 9 吸烟行为和电焊作业的实时反馈与系统报警
Fig. 9 Real-time feedback and system alarms for smoking behavior and electric welding operations

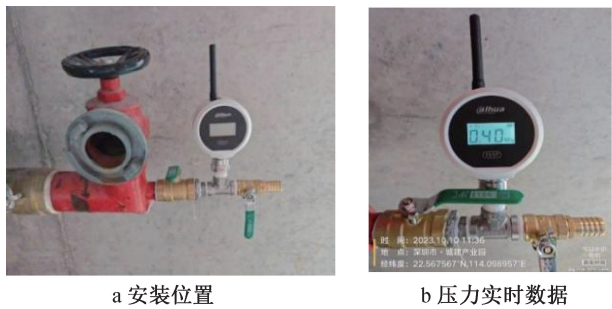


图 10 智能压力采集终端安装位置及实时监控数据
Fig. 10 Installation location of intelligent pressure collection terminal and real-time monitoring data

可靠性。响应时间差异主要由探测原理及传输方式所致:热成像设备通过有线传输实时上传热辐射信号,响应迅速;感温探测器采用无线传输,依赖热敏元件积累温升,响应相对滞后。总之,设备响应时间可满足施工现场火灾预警“早发现、快响应”的需求。

3.2.3 监测设备与系统通信距离测试

为验证报警器与网页终端间的数据传输质量和通信稳定性,设计 2 类典型环境下的不同直线距离测试,即无障碍物干扰的开阔环境(直线距离

表 1 监测设备与系统通信距离测试					
Table 1 Test of communication distance between monitoring equipment and system					
场景	编号	直线距离/m	设备是否报警	网页端是否显示异常信息	平均传输时间/s
场景 1: 无障碍物干扰的开阔环境	1-1	15	报警	显示	3.40
	1-2	30	报警	显示	4.32
	1-3	45	报警	显示	4.52
	1-4	60	报警	显示	5.50
	1-5	75	报警	显示	6.18
	1-6	90	报警	不显示	—
	1-7	105	报警	不显示	—
场景 2: 存在墙体遮挡的室内环境	2-1	5	报警	显示	8.12
	2-2	10	报警	显示	9.60
	2-3	15	报警	显示	12.35
	2-4	20	报警	显示	13.41
	2-5	25	报警	不显示	—
	2-6	30	报警	不显示	—

15~105m),存在墙体遮挡的室内环境(直线距离 5~30m),以评估距离及障碍物对信号传输的影响。通过释放可控烃类气体(打火机模拟)触发报警,每组在相同距离下进行 15 次重复试验。可以发现,在开阔环境中,设备在 75m 范围内能将信号实时传输至网页端,>75m 后网页端不再显示异常信息,105m 内均可触发报警-喷淋系统联动,传输时间随距离增加而延长,75m 处平均传输时间为 6.18s,15m 处平均传输时间为 3.4s;在室内环境中,设备在 20m 内网页端可接收异常信息,传输时间随距离由 8.12s (5m)增加至 13.41s (20m),在 30m 内均可实现报警-喷淋系统联动。由此可得,本系统可实现最长 75m(无障碍)和 20m(墙体遮挡)范围内的稳定通信,且在 105m(无障碍)和 30m(墙体遮挡)范围内报警-喷淋系统联动迅速可靠,满足火灾预警需求。

此外,针对深圳罗湖某超高层建筑群特殊地理环境(周边存在密集高层建筑及住宅区遮挡),建议采用以下 2 种信号增强方案:①优化现场 WiFi 多节点中继架构,增强信号覆盖;②集成运营商 4G/5G 无线传输模块,构建混合通信网络,确保监控信息无盲区、零丢包传输。

4 结语

1)构建了由 3 层技术架构、多源传感器网络构成的火灾自动预警系统,结合云端大数据分析和移动终端可视化,保障了火灾隐患的早期识别、精准定位与闭环处置。

2)开发多传感器数据融合的预警平台,具备实时监测、视频联动、多端推送、智能运维与闭环管理等核心功能,有效提升管理效率和安全可靠性。

(下转第 78 页)

中的应用[J]. 施工技术(中英文),2022,51(19):128-130.

TIAN X Q,LEI F Y,TANG W,et al. Application of new polymer composite formwork system in engineering [J]. Construction technology,2022,51(19):128-130.

[16] 刘洋彤. 建筑铝模板市场推广影响因素分析及对策研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

LIU Y T. Analysis of influencing factors and countermeasures of building aluminum formwork market promotion[D]. Chongqing: Chongqing University,2015.

[17] 中国林业科学研究院木材工业研究所,山东新港企业集团有限公司,厦门市以和为贵建设工程管理有限公司. 混凝土模板用胶合板:GB/T 17656—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

Wood Industry Research Institute of China Academy of Forestry Sciences, Shandong Xingang Enterprise Group Co., Ltd., Xiamen YiheweiGui Construction Engineering Management Co., Ltd. Plywood for concrete form: GB/T 17656—2018 [S]. Beijing:Standards Press of China,2018.

[18] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd. Standard for design of steel structures:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.

[19] 同济大学,现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司. 铝合金结构设计规范:GB 50429—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

Tongji University, Modern Architectural Design Group Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd. Code for design of aluminium structures:GB 50429—2007[S]. Beijing: China Planning Press,2008.

[20] The third industrial revolution: the digitisation of manufacturing will transform the way goods are made and change the politics of jobs too[Z]. 2012-04-21.

[21] 陶雨濛,张云峰,陈以一,等. 3D 打印技术在土木工程中的应用展望[J]. 钢结构,2014,29(8):1-8.

TAO Y M, ZHANG Y F, CHEN Y Y, et al. Prospective applications of 3D printing technology in civil engineering[J]. Steel construction,2014,29(8):1-8.

[22] SHAHRUBUDIN N,LEE T C,RAMLAN R. An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications [J]. Procedia manufacturing,2019,35:1286-1296.

[23] 肖力光,仲小康. 3D 打印粗骨料混凝土的研究进展及应用[J]. 混凝土,2024(6):169-172,179.

XIAO L G,ZHONG X K. Research progress and application of 3D printed coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2024 (6): 169-172, 179.

[24] 徐亮,张利伟. 基于“BIM+3D 打印技术”在异性混凝土构件模具设计中应用研究[J]. 工业建筑,2023,53(S2):231-233.

XU L,ZHANG L W. Research on the application of BIM+3D printing technology in the mold design of anisotropic concrete members[J]. Industrial construction,2023,53(S2):231-233.

(上接第 64 页)

3)该技术在深圳罗湖某超高层项目中进行了示范应用,结果表明,系统在无遮挡条件下可实现 75m、遮挡条件下 20m 范围内的稳定通信,且报警-喷淋系统联动迅速可靠,验证了技术方案的实用性与可行性,为超高层建筑全生命周期的安全运行提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 罗洪波,张英,王佳宁. 基于物联网技术的超高层建筑火灾风险动态评估方法[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2025,47(1):31-37.

LUO H B,ZHANG Y,WANG J N. Dynamic assessment method of fire risk in super high-rise buildings based on Internet of Things technology [J]. Journal of Wuhan University of Technology (information & management engineering),2025,47(1):31-37.

[2] 任浩,王宪杰,张林飞,等. 超高层建筑施工中起火预测及火灾模拟与人员疏散[J]. 科学技术与工程,2024,24(12):5114-5122.

REN H,WANG X J,ZHANG L F,et al. Fire prediction, fire simulation and personnel evacuation during the construction of super high-rise buildings [J]. Science technology and engineering,2024,24(12):5114-5122.

[3] 戴志宏. 建筑施工场所火灾成因及消防管理[J]. 消防科学与技术,2018,37(4):554-556.

DAI Z H. Discussion on fire cause and fire management of construction site[J]. Fire science and technology,2018,37(4):554-556.

[4] 杨易,钟尚轩,解学峰,等. 超高层建筑烟囱效应的现场实测和压差特性分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(3):148-156.

YANG Y,ZHONG S X,XIE X F,et al. Field measurement of stack effect for super high-rise buildings and their stack pressure characteristics[J]. Journal of building structures,2023,44(3):148-156.

[5] 路永明,孟繁欣,李嘉琪,等. 基于 BIM、物联网技术的智能管控平台在火灾报警系统中的应用[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(S1):134-137.

LU Y M,MENG F X,LI J Q,et al. Application of intelligent control platform based on BIM, Internet of Things technology in fire alarm system [J]. Water resources and hydropower engineering,2021,52(S1):134-137.

[6] 闫肃. 基于物联网与深度神经网络的建筑单体火灾动态风险自适应评估体系[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

YAN S. Adaptive dynamic risk assessment system of building monomer fire based on Internet of Things and deep neural network [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021.

[7] 彭天海,陈羽,杨帆,等. 高层建筑电气火灾监控终端信息模型[J]. 山东大学学报(工学版),2022,52(5):132-140.

PENG T H, CHEN Y, YANG F, et al. Information model of electrical fire monitoring terminal in high-rise building [J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2022, 52(5):132-140.