



Research on the Transformation of Modern Architectural
Design Paradigms Driven by BIM

BIM驱动的现代建筑设计范式转型研究

周立广 张源 高明 主编



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Research on the Transformation of Modern Architectural Design Paradigms
Driven by BIM

题目：BIM 驱动的现代建筑设计范式转型研究

Author: Liguang Zhou, Yuan Zhang, Ming Gao

作者：周立广 张源 高明

ISBN: 979-8-90040-434-9

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Research on the Transformation of Modern Architectural Design Paradigms
Driven by BIM**

BIM 驱动的现代建筑设计范式转型研究

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.5

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in July 2026

Printing: First printing in July 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

内容简介 ABSTRACT

本书以 BIM 技术为核心抓手，聚焦建筑防火领域，系统探究数字化浪潮下现代建筑设计范式的变革逻辑，结合传统建造智慧、城乡建筑实践、土木工程应用与行业组织发展，构建了完整的理论与实践体系。全书共十章，首先梳理研究背景、核心概念与国内外研究进展，厘清建筑防火设计与 BIM 技术的内在关联；溯源传统建筑防火布局、材料及构造经验，探讨传统营造技艺在当代设计中的传承与创新。结合乡村振兴、城市更新两大时代背景，对比城乡新建建筑、既有建筑改造的消防规划策略、设计难点与技术路径，分析装配式建筑、异形建筑、地下空间等现代建筑的防火优化方法。书中重点阐述 BIM 在结构抗火模拟、消防管网集成、火灾后损伤评估、全生命周期运维等场景的应用，延伸至 CIM 平台下消防数据资产的价值挖掘，同时剖析设计单位应用 BIM 消防设计的现实阻力、人才培养与团队协作问题，最后总结研究成果并展望行业发展方向。本书兼顾理论研究、案例分析与实践总结，可供建筑设计、消防工程、土木工程、城乡规划等领域科研人员、工程技术人员及高校相关专业师生参考，也为行业推进数字化防火设计、推动设计范式升级提供了可行思路与实践借鉴。



前言

PREFACE

建筑防火是保障建筑安全、守护人身与财产安全的核心环节，贯穿建筑策划、设计、施工、运维全生命周期。随着我国城乡建设快速推进，城市更新持续深化、乡村振兴全面落地，装配式建筑、复杂异形建筑、地下综合空间等新型建筑大量涌现，建筑功能日趋多元、空间形态愈发复杂，传统依托规范条文的被动式防火设计模式，逐渐难以适配现代建筑多样化的消防安全需求。与此同时，BIM、CIM 等数字化技术快速普及，凭借三维可视化、仿真模拟、数据集成、全流程协同等优势，打破了传统设计模式的技术壁垒，为建筑防火设计从规范驱动向性能驱动转型提供了强大技术支撑，也推动整个建筑设计行业迎来范式性变革。

我国拥有悠久的传统建造历史，传统建筑在布局、选材、构造方面积淀了大量实用防火智慧，如何在现代设计中传承活化这类经验，实现传统营造技艺与现代数字技术的融合，成为当下建筑领域的重要研究课题。在新型城镇化与数字中国双重战略加持下，智慧建造、数字建筑已成为建筑行业转型升级的核心方向，消防设计作为建筑安全管控的关键一环，其数字化、精细化、全周期化改革迫在眉睫。现阶段多数设计人员依旧沿用静态、固化的条文式防火设计思维，无法适配复杂建筑空间火灾推演、动态疏散模拟、全周期风险预判等高阶需求；同时城乡二元结构下，城市高密度建筑群、老旧小区街区与乡村零散民居、传统聚落的消防短板各不相同，适配两类场景的一体化数字化消防设计体系长期处于空白状态。当前国内相关研究多偏向单一技术应用或专项消防设计，鲜有从建筑学整体视角，结合城乡差异、土木工程融合、行业组织、人才培养等多维度，系统剖析 BIM 技术对建筑设计范式的重塑作用。基于行业现存短板与实际工程需求，笔者结合多年理论研究、项目实践与行业调研成果，撰写本书。全书立足建筑学本位，串联传统防火智慧、城乡建筑消防实践、现代建筑防火优化、BIM 数字化应用、运维数据

利用、行业发展变革六大板块，内容层层递进。

书中结合乡村新建建筑、既有民居改造、城市历史街区更新、隧道及地下空间等典型工程场景，区分城乡消防设计的差异化策略；深入讲解 BIM 在结构抗火分析、消防系统集成、烟气疏散模拟、火灾损伤评估等关键技术应用，探索消防数据资产化路径；同时直面行业现实问题，分析 BIM 消防设计落地难点，从人才培养、团队协作、政策标准等方面提出优化路径。全书坚持理论联系实际，兼顾学术性、实践性与前瞻性，既梳理基础理论与发展脉络，也列举大量工程案例、总结实操方法，力求全面展现 BIM 技术引领下建筑防火乃至整个建筑设计行业的转型全貌。

本书共 10 章，周立广负责第 1-5 章，共 8 万字；张源负责第 6-8 章，共 7 万字；高明负责第 9-10 章，共 5 万字。

本书旨在为广大从业者理清发展思路，助力行业加快数字化转型，推动传统建造智慧与现代数字技术深度融合，助力城乡建筑消防安全水平稳步提升。限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

目录 CONTENTS



第一章 绪论：建筑学视域下的消防与设计范式转型	1
第一节 研究背景与问题提出：当代建筑设计的消防挑战	1
第二节 核心概念界定：建筑防火设计与 BIM 技术关联	5
第三节 国内外研究现状述评：从规范驱动到性能驱动	9
第四节 研究内容、方法与技术路线	13
第二章 建筑设计及其理论：传统建造智慧中的消防策略	19
第一节 传统建筑防火布局与构造经验解析	19
第二节 乡土材料与构造体系的防火性能再认知	24
第三节 传统建造智慧在现代建筑设计中的传承路径	28
第四节 基于文化延续性的消防设计创新	33
第三章 乡村规划设计理论与实践：新建与改造并重	39
第一节 乡村振兴背景下的消防规划策略	39
第二节 乡村公共建筑的新建：功能、防火与地域性融合	44
第三节 乡村住宅建筑的新建：防火单元、疏散与材料选择	48
第四节 乡村既有建筑改造：消防性能提升与传统风貌协调	52
第四章 城市更新与乡村改造中的消防策略比较	57
第一节 城市更新背景下的既有建筑消防改造难点	57
第二节 城市密集区历史街区的防火韧性提升	62
第三节 乡村空心化与传统聚落的消防适应性改造	66
第四节 城乡改造中消防策略的差异与互鉴	70
第五章 现代建筑设计方法融合下的消防性能优化	77
第一节 生成式设计与建筑防火形态优化	77
第二节 可持续建筑设计中的主动与被动防火策略	81

第三节 装配式建筑构件防火设计与节点处理·····	86
第四节 复杂形态建筑的烟气控制与疏散模拟·····	91
第六章 BIM 与土木工程融合：结构防火与消防韧性设计·····	97
第一节 基于 BIM 的结构抗火分析与构件性能模拟·····	97
第二节 钢筋混凝土及钢结构防火保护的数字化建模·····	103
第三节 土木工程视角下的消防荷载与结构冗余·····	109
第四节 火灾后结构损伤评估与 BIM 辅助决策·····	114
第七章 消防系统与土木工程基础设施的集成设计·····	121
第一节 消防水系统管网与建筑结构协同布置·····	121
第二节 防排烟竖井、管道井的结构整合设计·····	127
第三节 消防设备基础、检修通道与土建预留·····	134
第四节 地下空间、隧道等特殊结构的消防集成案例·····	139
第八章 BIM 数据资产在土木工程运维中的消防价值延伸·····	147
第一节 设计—施工—运维阶段消防数据的资产化路径·····	147
第二节 基于 BIM 的消防设施全生命周期管理·····	155
第三节 城市信息模型（CIM）中的消防基础设施数据·····	160
第四节 消防 BIM 数据驱动的土木工程运维决策·····	167
第九章 转型阻力、实施路径与组织变革——建筑学组织视角·····	175
第一节 建筑设计单位应用 BIM 进行消防设计的现实障碍·····	175
第二节 建筑学人才培养中消防与 BIM 知识融合策略·····	183
第三节 设计团队协作文化的重塑：消防工程师与建筑师·····	190
第四节 政策、市场与标准对建筑设计消防范式的影响·····	197
第十章 结论与展望：面向智慧建造与乡村未来的建筑消防设计·····	205
第一节 主要研究发现与结论总结·····	205
第二节 传统智慧与现代技术融合下的消防设计范式特征·····	212
第三节 乡村振兴与城市更新中的消防策略展望·····	219
第四节 对建筑学教育、职业实践及乡村建设的启示·····	227
参考文献·····	235

第一章 绪论：建筑学视域下的消防与设计范式转型

第一节 研究背景与问题提出：当代建筑设计的消防挑战

城市化高质量发展阶段下，我国建筑行业呈现高层集聚、形态复合、装配集成的全新发展特征，建筑空间功能、结构形式与用材体系的革新，彻底打破传统建筑消防防护的基础边界。长久以来国内建筑防火设计依托标准化规范完成方案编制、图纸审核与落地施工，适配常规化、单一化建筑业态，但面对新型复杂建筑，静态化、条文化的防火设计模式暴露出多重结构性短板。在此行业发展背景下，本章节立足建筑学视角，结合建筑行业发展趋势与消防设计现存矛盾，剖析传统防火设计体系的适配困境，探究数字化技术赋能消防设计的底层逻辑，明确本研究的核心攻坚方向与研究价值。

一、当代建筑行业多元化发展整体趋势

新型城镇化建设进程持续深化，城市土地资源集约利用理念深入建筑行业顶层设计，叠加大众多元化空间使用需求、建筑工艺迭代升级双重因素，国内建筑业态摆脱以往单一板式、塔式常规形态，逐步向复杂化、超高层化、装配式三大方向转型，重塑现代建筑的空间结构与建造模式，同时也为建筑消防安全管控带来全新变量。

（一）建筑形态复杂化发展

消费经济与文旅产业、商业综合体产业融合发展，推动公共建筑空间从单一功能向复合多功能模式演变。现阶段大型公共建筑普遍整合商业购物、休闲娱乐、办公住宿、会展展演、交通集散等多项功能，建筑内部空间打破传统墙体、楼层的分割模式，出现大量连通中庭、镂空挑空、共享廊道、下沉广场等特殊空间结构。此类复合型建筑内部动线交叉重叠、功能分区边界模糊，人员流动具备高密度、无规律、多时段特征；同时建筑内部装饰材料、功能性设备管线数量大幅增

加，可燃易燃材质应用范围更广，火灾荷载呈现指数级增长。从消防运行逻辑来看，复杂异形空间会改变烟气扩散路径与空气对流规律，火灾发生后高温有毒烟气易在中庭、挑空区域集聚滞留，快速覆盖多层建筑空间，大幅缩短人员安全疏散时长，常规防火分区、防烟排烟设计手段难以实现有效防控。

（二）建筑体量高层化、超高层化发展

为缓解城市核心区域土地资源紧张的发展矛盾，超高层建筑成为一线、新一线城市地标建筑的主要形态，住宅、办公、商业类高层建筑占城市新建建筑总量比重逐年攀升。区别于多层建筑，高层建筑具备垂直空间跨度大、疏散路径单一、竖向井道密集等固有特征，电梯井、管道井、通风竖井等竖向通道形成天然“烟囱效应”，火灾发生后烟气与火势会沿竖向通道快速纵向蔓延，短时间内蔓延至整栋建筑。除此之外，高层建筑人员基数庞大、竖向疏散难度远高于水平疏散，火灾应急救援受建筑高度、消防设备扬程、外部救援场地限制，地面消防救援设备难以覆盖超高层区域，主要依赖建筑自身防火设计与消防设施实现自救。当前多数高层建筑仍沿用多层建筑的基础防火设计思维，并未结合高层竖向火灾传播特性优化设计方案，消防安全隐患长期存在。

（三）建造模式装配式集成化发展

双碳战略落地与建筑工业化转型，促使装配式建筑成为我国绿色建筑发展的核心方向，国家住建部门也出台多项扶持政策，推动装配式构件生产、一体化施工技术普及应用。装配式建筑以预制墙板、预制楼板、集成式机电构件为核心组成部分，现场拼装的建造模式能够有效缩短施工周期、降低建筑垃圾排放量，契合绿色建筑发展理念。但从消防设计层面分析，装配式建筑防火短板较为突出：其一，预制保温板材、复合围护板材多为有机可燃材质，耐火极限偏低，遇明火易快速燃烧并释放有毒烟气；其二，构件拼装拼接产生大量缝隙，封堵施工质量参差不齐，火灾烟气可通过缝隙穿透防火分区，破坏防火分隔体系；其三，模块化集成建造模式下，机电管线、装饰结构一体化程度较高，后期消防隐患排查、破损构件检修难度大幅提升，传统防火运维模式无法适配装配式建筑全周期消防管理需求。

二、现行建筑防火设计模式的内在局限性

我国建筑防火设计体系历经数十年发展，已形成以国家及地方防火规范为核

心，覆盖方案设计、施工图审查、施工验收、后期运维全流程的标准化管控体系。该模式在常规中小型建筑项目中具备成本低、效率高、易落地的优势，但针对复杂化、高层化、装配式新型建筑，条文驱动型静态设计模式的局限性全面暴露，无法匹配现代化建筑消防设计的动态化、精细化发展需求。

（一）规范条文适配性存在边界约束

现行防火设计规范以常规矩形平面、分层独立结构的传统建筑为编制基础，对防火分区面积、疏散通道宽度、安全出口数量、消防设施配置等指标设置固定量化阈值，属于一刀切式的标准化管控手段。规范条款无法兼顾异形曲面建筑、超大中庭综合体、装配式特殊构造建筑的差异化特征，部分新型建筑的空间结构、构件形式无法套用现有规范条文。设计人员若严格遵循固定条文开展设计，会出现空间利用率下降、设计方案与建筑功能冲突等问题；若突破规范约束，则需要开展专项消防评审，评审流程繁琐、周期漫长，且评审标准缺乏统一量化依据，极大制约建筑设计创新与项目落地效率。

（二）静态图纸设计脱离火灾动态演化规律

现阶段绝大多数建筑防火设计依托二维施工图纸完成，设计人员仅能依据规范要求，静态划分防火分区、布置疏散通道与消防设备，仅能完成基础防火布局，无法对火灾全过程进行动态推演。火灾属于多变量耦合的复杂动态灾害，火势蔓延速度、烟气扩散范围、人员疏散状态会受室内温度、通风条件、人员密度、可燃物分布等多重因素影响，且各项变量处于实时变化状态。二维静态图纸仅能展示建筑完工后的固定空间形态，无法模拟不同起火点位、不同火灾荷载场景下的烟气流动轨迹、温度变化曲线，也不能预判疏散瓶颈、拥堵点位等应急痛点，设计方案存在明显的滞后性与片面性，难以从根源上规避火灾安全风险。

（三）全周期消防管控体系存在断层问题

规范驱动模式下的防火设计工作集中于建筑前期方案设计与施工图绘制阶段，施工阶段仅核对消防设施安装位置、防火构件参数是否符合规范，运营阶段仅开展定期消防巡检与设备维保，三个阶段相互独立、数据无法互通。设计阶段的防火布局数据、可燃物参数无法同步至施工与运维阶段；施工阶段的构件变更、管线调整信息无法反向优化前期设计方案；运维阶段的火灾隐患数据、设备故障数据也无法反馈至设计端，形成数据孤岛。全流程管控断层导致建筑全生命周期内消防资源无法统筹配置，隐患溯源、风险预警难度较大，整体消防防控效能大

打折扣。

三、BIM 数字化技术介入防火设计的必要性与核心问题

面对当代建筑消防设计的多重困境，行业亟需突破传统静态设计思维桎梏，依托数字化工具搭建动态化、精细化、全周期的新型防火设计体系。BIM 技术凭借全信息集成、三维可视化、多工况仿真模拟的核心优势，成为破解复杂建筑消防设计难题的最优载体，也是推动建筑消防设计范式转型的核心技术支撑。

（一）适配复杂建筑差异化设计需求

区别于二维图纸单一可视化功能，BIM 技术可整合建筑几何形态、构件材质、火灾荷载、机电管线等全方位信息，构建高精度三维数字化建筑模型，完整还原复杂异形建筑、超高层建筑、装配式建筑的真实空间状态。针对超出现行规范约束的特殊建筑空间，设计人员可依托 BIM 模型开展多元化防火方案比选，结合建筑功能属性调整防火分区布局、优化疏散路径，平衡建筑设计创新性与消防安全稳定性，打破传统规范条文对新型建筑设计的束缚，为非常规建筑消防方案设计提供全新解决路径。

（二）实现火灾工况动态仿真推演

BIM 模型可联动 FDS、Pathfinder 等专业消防仿真软件，搭建双向数据互通接口，基于真实建筑参数模拟不同起火场景下的火灾演化全过程。一方面能够精准测算烟气蔓延速率、有毒气体浓度、火场温度极值，定位高危火灾区域，辅助设计人员优化防烟排烟系统、防火分隔结构；另一方面可开展人员疏散仿真模拟，结合人员年龄结构、行走速度、空间认知能力等参数，预判疏散拥堵节点，优化安全出口、疏散楼梯、应急通道的布局方案，从被动合规设计转向主动风险防控，弥补静态图纸设计的核心短板。

（三）本研究核心科学问题凝练

结合行业发展趋势与技术应用痛点，本研究立足建筑学宏观视角，以范式转型为核心主线，重点攻克三大核心科学问题：第一，系统拆解当代复杂建筑火灾风险形成机理，厘清传统规范式防火设计与新型建筑业态之间的适配矛盾，明确范式转型的底层动因；第二，探究 BIM 技术与建筑防火设计全流程的融合机制，搭建涵盖建模、仿真、优化、运维一体化的数字化防火设计技术框架；第三，结合城乡不同层级建筑特征，兼顾传统防火营造智慧与现代化数字技术，构建适配

我国建筑行业现状的 BIM 性能化防火设计实施体系与保障机制。

建筑复杂化、高层化与装配式的行业发展趋势，倒逼传统防火设计模式完成转型升级，现行规范驱动的静态设计模式已无法适配现代化建筑消防防控需求。BIM 数字化技术凭借全方位信息集成与动态仿真能力，成为破解当下消防设计痛点、推动防火设计从被动合规转向主动风控的关键抓手。基于此展开数字化消防设计范式转型研究，既是顺应建筑工业化、数字化发展的必然趋势，也是提升我国城乡建筑消防安全韧性的核心途径。

第二节 核心概念界定：建筑防火设计与 BIM 技术关联

建筑防火设计与 BIM 数字化技术的交叉融合，涉及消防工程、建筑学、数字信息技术等多学科专业概念，明晰相关核心术语定义、辨析同类概念内涵差异、厘清技术融合内在逻辑，是开展本研究的基础前提。本节立足于建筑学与消防工程双重学科视角，界定性能化防火设计、建筑消防韧性两大行业核心概念，拆解 BIM 全信息模型的技术内核与消防应用价值，搭建技术与设计双向融合的逻辑框架，为后续章节理论研究与案例实证筑牢理论根基。

一、建筑防火设计相关核心概念

建筑防火设计是建筑整体设计体系的重要分支，贯穿建筑策划、方案设计、施工建造、运营报废全生命周期，核心目标为通过空间布局优化、防火构件配置、消防系统搭建、管理制度完善等手段，降低火灾发生概率、遏制火势蔓延、保障人员与财产安全。现阶段行业内形成规范式防火与性能化防火两大并行设计模式，同时消防韧性成为评判建筑防火设计质量的全新核心指标，三者共同构成现代建筑消防设计的理论基础。

（一）规范式防火设计

规范式防火设计也被称为指令性防火设计，是我国建筑行业应用最广泛的传统设计模式，其核心运行逻辑为以国家、行业及地方颁布的消防技术规范、强制性条文为唯一设计依据，所有防火设计指标均严格对标规范量化标准。该设计模式核心内容涵盖建筑耐火等级划定、防火分区与防烟分区划分、疏散通道与安全出口设置、消防给水系统、自动报警系统、防排烟系统配置等基础模块。规范式

防火设计具备标准化、同质化、易审核、低成本的特征，适用于住宅、普通多层办公建筑、小型商铺等结构简单、功能单一的常规建筑。但其设计思维具备极强的被动性，仅以满足规范底线要求为设计目标，忽视建筑个体空间差异、火灾动态变化特征，无法适配新型复杂建筑的防火设计需求。

（二）性能化防火设计

性能化防火设计是区别于传统指令式设计的现代化主动防控型设计模式，该模式不再以固定条文为约束，而是以建筑火灾风险评估、人员安全疏散判定为核心导向，结合建筑空间形态、功能定位、人员特征，制定个性化防火设计目标与性能判定指标。在设计流程层面，性能化防火设计需完成火灾场景设定、火源参数测算、烟气与疏散仿真模拟、风险等级评级、方案优化迭代五大环节；在设计目标层面，以“火灾发生后指定时间内人员可安全疏散、建筑主体结构不受不可逆损毁、火灾风险处于可控范围”为核心判定标准。相较于规范式设计，性能化设计具备灵活性、针对性、动态性三大优势，能够适配超高层、复合型综合体、异形建筑等非常规项目，也是数字化消防设计范式转型的核心发展方向。

（三）建筑消防韧性

消防韧性是韧性城市理念在建筑微观层面的延伸应用，指代建筑系统抵御火灾灾害、吸收灾害冲击、快速恢复运行状态的综合能力，是衡量建筑防火设计完整性、科学性的高阶评价指标。完整的建筑消防韧性包含三重维度内涵：其一为抵御能力，即建筑依托防火构件、消防系统，延缓火势蔓延、降低火灾破坏程度的基础能力；其二为适应能力，即火灾发生后，建筑空间可适配人员疏散、应急救援作业，降低人员伤亡概率的适配能力；其三为恢复能力，即火灾灾害结束后，建筑受损构件、消防设施可快速修复，建筑功能快速恢复常态化运营的再生能力。消防韧性理念打破以往仅聚焦火灾防控的单一设计思维，实现防控、疏散、救援、修复全链条一体化设计，完善现代建筑防火设计的评价体系。

二、BIM 全信息模型技术内核与数据分类

BIM 技术即建筑信息模型技术，并非单一类别的建模软件，而是集三维建模、数据集成、工况模拟、协同管理于一体的数字化技术体系，能够承载建筑全生命周期所有结构化与非结构化数据。相较于传统二维建模工具，BIM 技术的核心优势在于全要素信息集成，不同类型的数据在消防设计场景中具备差异化应用价值，

拆解其技术内核与数据类型，是实现 BIM 与防火设计深度融合的关键。

（一）BIM 全信息模型技术内核

从技术本质层面分析，BIM 全信息模型是以三维数字化模型为载体，整合建筑从前期策划到后期报废全流程数据的动态数据库，模型中的每一个建筑构件均为独立信息载体，可同步存储几何参数、物理属性、施工参数、运维数据等多重信息。该技术内核主要包含三大特征：一是可视化特征，以三维立体模型替代二维线条图纸，直观展示建筑空间结构、构件位置关系，降低复杂消防布局的解读难度；二是协同化特征，支持设计、施工、运维、审核多方主体同步调取、更新模型数据，打破各参与方之间的数据壁垒；三是动态迭代特征，模型数据可根据建筑方案变更、施工调整、运维损耗实时更新，实现建筑全生命周期动态数字化复刻。

（二）几何模型数据及消防应用价值

几何模型数据是 BIM 模型最基础的组成部分，主要涵盖建筑整体轮廓、楼层结构、墙体柱网、门窗洞口、疏散通道、机电管线、竖向井道等空间几何参数，完整复刻建筑物理空间形态。在消防设计工作中，几何数据是所有防火设计与仿真模拟的基础载体，一方面可辅助设计人员完成防火分区、防烟分区的精准划分，解决异形空间分区边界模糊的行业痛点；另一方面能够为火灾烟气模拟、人员疏散模拟提供空间底层数据，保障仿真结果与建筑实际工况高度契合。同时，三维几何模型可直接用于消防图纸报审、专项评审工作，提升复杂建筑消防方案审核的精准度与效率。

（三）属性信息与工况模拟数据及消防应用价值

属性信息指代 BIM 构件附加的非几何类静态数据，涵盖构件耐火等级、装饰材料燃烧性能、可燃物荷载、消防设备参数、建筑耐火极限、疏散设施额定容量等基础参数；工况模拟数据则属于动态衍生数据，是依托基础模型与属性数据，通过仿真软件测算得出的火灾温度、烟气浓度、疏散时长、风险点位等模拟结果。属性信息为性能化防火设计提供量化基础，支撑设计人员完成火灾风险等级划分；工况模拟数据则能够直观暴露防火设计方案短板，为疏散路径优化、消防设备点位调整、防火结构升级提供数据支撑，二者相辅相成，共同构成数字化防火方案优化的决策依据。

三、BIM 技术与建筑防火设计的内在关联逻辑

BIM 技术与现代建筑防火设计的融合并非简单的技术叠加，而是基于行业发展需求，从设计、施工、运维三个维度重构防火设计运行体系，形成以数字化建模为基础、仿真模拟为核心、全周期管控为保障的深度融合模式，全方位补齐传统防火设计模式的短板，推动防火设计从规范驱动向性能驱动转型。

（一）数字化建模：夯实性能化设计数据基础

数字化建模是 BIM 技术介入防火设计的首要环节，区别于传统二维图纸碎片化的数据存储模式，BIM 一体化建模模式可同步整合建筑空间几何数据与消防相关属性数据，搭建高精度、全要素的数字化消防模型。针对复杂建筑项目，设计人员可基于 BIM 模型完成多版本防火方案快速迭代与横向对比，依托模型数据自动校验防火分区面积、疏散通道宽度等基础指标，筛选最优设计方案。同时标准化 BIM 模型可实现数据一键导出，适配施工图审查、消防专项评审等官方流程，简化设计报审环节，打通设计与审核之间的数据传输壁垒。

（二）多工况仿真：赋能主动型火灾风险防控

多工况仿真模拟是 BIM 技术赋能性能化防火设计的核心环节，依托 BIM 与消防仿真软件的数据互通接口，可实现火灾蔓延、烟气扩散、人员疏散三大场景的全维度模拟。设计人员可结合建筑业态特征，设定多组差异化起火场景，模拟不同可燃物、不同起火点位下的火灾演化规律，精准定位消防薄弱区域；同时基于人员密度、人员行动特征开展疏散仿真，测算最短安全疏散时间，校核防火设计方案的安全冗余。该模式彻底改变传统设计事后校验的被动模式，实现事前预判、事中优化的主动型风险防控。

（三）全周期管控：完善建筑消防韧性运维体系

全周期管控聚焦建筑施工与运营维护阶段，实现 BIM 防火模型的全生命周期复用。在施工阶段，施工单位可依托 BIM 模型核对防火构件、消防设备的安装参数，规避施工偏差，保障设计方案落地质量；在运维阶段，管理人员可将消防设备巡检数据、隐患排查数据、日常维保数据录入 BIM 模型，搭建动态消防隐患数据库，实现故障设备自动预警、火灾隐患溯源追踪。此外，模型可联动智慧消防平台，接入温感、烟感等智能传感器，实时监测建筑内部消防安全状态，完善建筑消防韧性运维体系。

规范式防火设计与性能化防火设计分别对应建筑消防行业传统与现代两大发展阶段，建筑消防韧性为防火设计质量提供量化评价标准；BIM 技术凭借多维度数据承载能力与仿真模拟能力，能够全方位适配性能化防火设计的各项需求，覆盖建筑设计、施工、运维全生命周期。厘清上述概念内涵与技术融合逻辑，可为后续剖析国内外研究现状、搭建专属研究框架提供坚实的理论支撑，同时明确数字化消防范式转型的具体实施路径。

第三节 国内外研究现状述评：从规范驱动到性能驱动

全球建筑消防行业均历经从经验防控、规范管控到数字化性能防控的发展历程，欧美、日本等发达国家较早开展 BIM 性能化防火设计、城市层级 CIM 消防建模相关研究，已形成成熟的理论体系与工程落地模式；国内相关研究起步时间较晚，虽依托行业数字化转型政策红利实现快速发展，但整体研究仍存在碎片化、不均衡、体系缺失等问题。本节系统梳理国内外相关研究成果，评析现有研究优势与短板，挖掘学术研究空白，确立本研究的创新切入点与研究定位。

一、国外相关研究现状与落地经验

国外建筑防火研究起步于 20 世纪中期，早期研究聚焦防火材料研发、防火规范编制等基础领域；20 世纪 90 年代后，数字化技术快速普及，国外学者逐步打破传统规范约束，将 BIM、CIM、大数据等技术与性能化防火设计相结合，围绕单体建筑消防仿真、城市集群火灾防控、数字化规范适配等方向展开深入研究，现阶段已完成从规范驱动到性能驱动的整体范式转型。

（一）BIM 性能化防火模拟相关研究

欧美国家率先将 BIM 技术引入性能化防火设计领域，早期研究主要攻克 BIM 与消防仿真软件的数据互通难题。美国国家标准与技术研究院针对 FDS 火灾动力学模拟软件开展专项优化，开发适配 BIM 模型的数据导入接口，解决几何模型数据失真、属性数据无法同步的行业难题，为性能化仿真模拟提供技术支撑。在此基础上，国外学者展开多元化实证研究：部分学者以超高层办公建筑、大型商业综合体为研究对象，基于 BIM 模型开展多场景火灾与疏散模拟，提出基于疏散安全冗余值的防火方案优化方法；还有研究团队聚焦装配式建筑防火痛

点，依托 BIM 构件属性数据库，测算不同预制板材的火灾荷载系数，建立装配式建筑专用性能化防火评价标准。与此同时，英国、澳大利亚等国家直接修订国家级防火规范，明确允许复杂建筑采用 BIM 性能化设计模式，并出台配套的仿真参数标准、评审流程，实现技术研究与行业规范的双向适配。

（二）CIM 城市层级消防建模相关研究

随着智慧城市理念普及，国外研究视角从单体建筑防火逐步延伸至城市片区集群消防防控，CIM 城市信息模型成为核心研究载体。日本作为地震、火灾灾害高发国家，在城市消防数字化领域研究成果尤为突出，东京大学研究团队搭建全域 CIM 消防模型，整合片区内建筑消防参数、消防救援站点位置、市政消防水源、道路通行能力等多维数据，结合大数据算法预判片区火灾风险等级，动态调配应急救援资源，该模式已在东京多个核心商圈落地应用。欧盟联合多国科研机构推出智慧消防城市项目，依托 CIM 模型搭建统一消防数据平台，实现建筑火灾隐患实时监测、跨区域救援协同调度，同时构建城乡差异化火灾风险评估体系，兼顾城市高密度建筑与乡村低层民居的消防防控需求。

（三）国外研究落地经验总结

综合分析国外现有研究成果与工程案例，其成熟经验可归纳为三个层面：制度层面，各国均出台适配性能化防火设计的法律法规与行业规范，简化专项评审流程，为数字化消防技术落地提供制度保障；技术层面，形成“BIM 基础建模—多工况仿真模拟—风险量化评级—方案迭代优化”的标准化技术流程，统一仿真参数阈值，降低技术应用门槛；应用层面，实现单体建筑 BIM 消防与城市 CIM 消防互联互通，打通微观建筑与宏观城市之间的数据壁垒，构建全域一体化消防防控体系。上述经验可为我国消防设计范式转型提供重要参考，但仍需结合国内建筑业态、规范体系、城乡发展特征进行本土化适配。

二、国内相关研究现状与现存短板

国内 BIM 消防相关研究始于 21 世纪初，2015 年之后，国家住建部相继发布多项建筑行业数字化转型政策，鼓励数字化技术融入消防设计、施工、运维环节，国内高校、科研院所、头部建筑企业纷纷开展相关研究。现阶段国内研究已覆盖 BIM 建模优化、火灾仿真模拟、智慧消防平台搭建等多个领域，但整体研究深度、落地程度与发达国家仍存在明显差距，行业发展短板较为突出。

（一）BIM 消防应用研究碎片化特征显著

碎片化是国内当前 BIM 消防研究最核心的短板，从研究主体层面来看，高校科研团队侧重火灾仿真算法优化、疏散模型参数校准等理论层面研究，忽视工程落地的实操性；建筑设计企业侧重利用 BIM 模型完成防火分区划分、图纸优化等基础工作，并未深度挖掘仿真模拟、全周期管控的技术价值；消防运维企业仅聚焦设备巡检、隐患预警等运维环节，三者研究方向相互割裂，未形成理论－设计－运维一体化的研究闭环。从研究内容层面来看，现有研究多针对单一建筑类型、单一火灾场景展开实证分析，尚未提炼普适性的设计方法与技术流程，同时缺少配套的行业实施标准，导致 BIM 性能化防火设计仅能应用于少数重点地标项目，无法在全行业大范围普及。

（二）城乡建筑防火数字化改造研究不均衡

受城乡经济发展水平、数字化基础设施建设差距影响，国内相关研究呈现明显的重城市、轻乡村的失衡格局。城市层面，针对超高层建筑、大型商业综合体、装配式公共建筑的 BIM 消防数字化研究成果较为丰富，部分一线、新一线城市已落地智慧消防试点项目，数字化防控模式日趋成熟。乡村层面，现有研究大多停留在传统防火策略、消防设施配置优化层面，极少将 BIM、数字化仿真技术应用用于乡村民居、传统村落消防设计；同时现有研究忽视乡村木结构建筑集中、消防水源匮乏、疏散空间狭窄等独有特征，直接套用城市建筑数字化消防方案，适配性极差，城乡一体化消防数字化转型进程受阻。

（三）传统营造智慧与数字化技术相互脱节

我国传统古建筑、乡土民居经过数千年发展，积淀了丰富的被动防火营造智慧，涵盖建筑组团布局、防火街巷规划、防火构件设计、可燃材料优化等多个维度，是适配我国低层建筑、乡村建筑的特色防火手段。但现阶段国内研究存在两极分化现象：一部分学者专注挖掘传统建筑防火营造技艺，仅停留在历史梳理与定性分析层面，未结合现代化技术完成创新升级；另一部分学者深耕数字化消防技术研究，全盘否定传统被动防火模式，单纯依托 BIM 技术完成主动防控设计。两类研究互不交融，无法形成“传统被动防火＋现代主动防控”的复合型设计模式，造成研究资源浪费，也制约了适配我国本土建筑的消防设计体系构建。

三、现有研究空白与本研究创新切入点

综合国内外研究现状可知，全球建筑消防行业向数字化、性能化方向转型已是必然趋势，国外成熟的技术体系与制度经验、国内多元化的单项研究成果，均为本研究提供扎实的理论基础与参考依据。但结合行业发展实际需求来看，现有研究仍存在多项空白，无法全方位支撑我国建筑消防设计范式转型升级，本研究以此为突破口，确立差异化创新研究方向。

（一）现有研究核心空白

结合前文研究现状分析，当前学界主要存在三项研究空白：其一，缺少系统性的范式转型理论研究，国内现有文献多聚焦单一技术、单一案例分析，尚未从建筑学宏观视角，阐释建筑业态变革、规范体系升级、数字化技术迭代与消防设计范式转型之间的内在关联，未搭建完整的范式转型理论框架；其二，缺少城乡差异化一体化研究，尚未针对城市复杂建筑、乡村传统民居的差异化特征，制定分层级、分类别的 BIM 性能化防火设计方案，无法兼顾城乡二元建筑结构的消防发展需求；其三，缺少传统营造智慧与数字化技术融合研究，未探索传统被动防火营造技艺与 BIM 主动仿真防控的融合路径，尚未构建适配我国本土建筑特色的复合型防火设计体系。

（二）本研究核心创新切入点

针对上述研究空白，本研究以建筑学学科为底层视角，以消防设计范式转型为核心主线，展开全方位系统性研究，创新点主要包含三个维度：第一，从行业发展动因、技术支撑条件、制度保障机制三个层面，拆解建筑消防设计范式转型的完整逻辑，构建从规范驱动转向性能驱动、数字化驱动的完整理论体系，弥补宏观理论研究空白；第二，打破重城市轻乡村的研究固有思维，分别针对城市高层复杂建筑、乡村传统民居、装配式建筑三类主流业态，开展案例对比与仿真实证研究，制定城乡差异化 BIM 消防设计实施策略；第三，融合古今双重防火设计理念，萃取传统建筑被动防火营造智慧，将其融入 BIM 数字化建模与仿真优化环节，形成兼具本土特色与现代化水平的复合型防火设计新模式。

（三）研究价值定位

本研究的价值定位分为理论与实践两个层面：理论层面，完善建筑数字化消防与性能化防火设计的理论体系，填补城乡一体化消防数字化、传统与现代防火

技术融合的研究空白，丰富建筑学与消防工程交叉学科研究内容；实践层面，提炼普适性的 BIM 性能化防火设计流程与实施细则，适配城乡不同类型建筑项目，为设计单位、运维企业提供实操指导，同时为行业主管部门修订防火规范、出台数字化消防扶持政策提供数据参考与决策依据。

国外发达国家已完成消防设计范式转型，形成成熟的数字化性能化防火设计体系，可为国内行业升级提供经验参考；国内现有研究虽成果丰硕，但存在研究碎片化、城乡发展失衡、古今技术脱节等短板，且宏观转型理论体系缺失。基于现有研究空白，以范式转型为核心、兼顾城乡全域建筑、融合传统营造智慧与数字化技术开展研究，能够有效弥补行业研究短板，推动我国建筑消防行业高质量数字化转型。

第四节 研究内容、方法与技术路线

基于前文梳理的研究背景、核心概念、研究现状与现存空白，本节明确全书整体研究内容，划分核心研究板块，匹配适配性多元研究方法，规划层级清晰、逻辑闭环的技术研究路线。本章节作为全书研究框架的顶层设计部分，能够统筹后续所有章节的研究方向、研究重点与内容排布，保障整体研究工作有序、高效推进，同时明确研究边界与实施路径，提升研究成果的系统性、科学性与实操性。

一、全书核心研究内容及板块划分

结合本研究创新切入点与研究目标，遵循“理论溯源—现状剖析—技术研究—案例实证—对策优化”的整体逻辑，将全书研究内容划分为四大核心板块，四大板块相互衔接、层层递进，分别从理论、现状、技术、保障四个维度，全方位探究建筑学视域下建筑消防设计范式转型的完整路径，覆盖传统防火智慧、城乡建筑消防、数字化技术、行业保障体系四大研究方向。

（一）传统建筑防火营造智慧梳理板块

该板块属于基础理论溯源内容，核心研究目标为萃取适配我国本土建筑的被动防火设计智慧，为复合型防火设计模式提供理论支撑。研究内容主要包含两个层面：其一，纵向梳理我国古代至近现代不同历史阶段建筑防火营造理念，分析不同时代社会背景、建筑工艺、火灾防控需求对防火设计的影响，厘清传统防火

技艺的演化脉络；其二，横向拆解传统建筑被动防火的核心实现路径，从建筑组团布局、街巷防火间距、单体建筑防火构造、可燃材料改性、消防水源规划五个维度，总结古建筑、乡土民居的通用防火设计手法，并结合现代建筑业态特征，筛选可现代化转化的优质营造智慧，明确传统防火技术的适配边界与升级方向。

（二）城乡全域建筑消防设计现状板块

该板块聚焦行业发展现状，旨在厘清城乡不同类型建筑的消防痛点，为数字化技术落地提供靶向性研究方向。研究范围覆盖城市与乡村两大场域，囊括超高层建筑、复合型商业综合体、装配式公共建筑、乡村传统木结构民居、普通砖混民居五大主流建筑类型。针对城市建筑，重点剖析复杂化、高层化、装配式建筑的火灾风险机理，研判现行规范式防火设计的适配短板；针对乡村建筑，重点分析乡村消防基础设施短板、传统民居防火缺陷、村民消防安全意识薄弱等问题，对比城乡建筑火灾风险的差异化特征；最后结合城乡二元发展格局，剖析两类场域消防设计问题的成因，为后续差异化技术方案制定提供实证依据。

（三）BIM 数字化消防技术融合板块

该板块是全书的核心技术研究板块，承担破解行业痛点、实现范式转型的核心职能。本板块以性能化防火设计为载体，融合前文萃取的传统被动防火智慧与 BIM 数字化主动防控技术，搭建一体化数字化消防设计技术体系。主要研究内容包括：优化适配多类型建筑的 BIM 高精度消防建模方法，统一构件属性参数标准；搭建 BIM 与 FDS、Pathfinder 双向数据互通的仿真模型，制定多场景火灾与疏散模拟工况设定规范；结合传统被动防火布局理念，优化复杂建筑防火分区、疏散通道、外部救援空间的布局方案；分别针对城市复杂建筑与乡村民居，编制差异化 BIM 性能化防火设计操作流程，实现技术落地标准化、常态化。

（四）行业实施保障体系构建板块

技术落地离不开完善的制度保障，该板块从制度、人才、产业、监管四个维度，构建适配数字化消防设计范式的全方位行业保障体系。制度层面，提出防火规范条文修订建议，完善性能化防火专项评审制度，健全数字化消防设计法律法规；人才层面，优化高校建筑学、消防工程专业课程体系，搭建企业专项培训平台，培养兼具建筑设计能力与数字化技术能力的复合型人才；产业层面，扶持 BIM 消防专用插件、轻量化仿真软件研发，降低中小设计企业技术应用门槛；监管层面，搭建统一的数字化消防数据监管平台，实现设计、施工、运维全流程动态监

管，全方位保障新范式稳定落地推广。

二、多元化综合研究方法

为保障研究成果的科学性、全面性与实操性，规避单一研究方法的局限性，本研究结合多学科研究特征，整合人文社科与工程技术类研究手段，采用文献考据法、BIM 仿真模拟法、城乡案例对比法、行业调研法四类研究方法，多维度交叉验证研究结论，提升研究成果可信度。

（一）文献考据法

文献考据法主要服务于理论溯源板块研究，研究文献来源分为古籍文献、现代学术文献两类。古籍文献层面，系统搜集古代营造典籍、地方方志、古建筑修缮档案，梳理古代建筑防火布局、防火构造、消防治水等相关营造技艺，挖掘传统防火设计底层逻辑；现代学术文献层面，检索国内外 BIM 消防、性能化防火、建筑消防韧性、韧性城市等相关领域核心期刊、硕博论文、行业专著、规范文件，归纳现有研究成果、技术难点与行业政策，辨析研究空白，为本研究框架搭建、创新点确立提供理论支撑。

（二）BIM 仿真模拟法

BIM 仿真模拟法是本研究核心工程研究方法，贯穿技术与案例实证全过程。首先依托 Revit 软件搭建不同类型建筑的高精度 BIM 消防模型，完善构件耐火属性、火灾荷载等基础数据；随后联动 FDS 火灾动力学模拟软件与 Pathfinder 人员疏散模拟软件，设定常规火灾、极端火灾两类基础工况，完成火势蔓延、烟气扩散、人员疏散多维度仿真测算；最后对比不同防火设计方案下的仿真数据，结合安全阈值筛选最优方案，同时验证传统被动防火智慧与数字化技术融合方案的实际应用效果，为对策提出提供数据支撑。

（三）城乡案例对比法

案例对比法用于破解城乡研究失衡问题，本研究选取 6 组典型实证案例，涵盖城市超高层办公建筑、大型商业综合体、装配式公共建筑，以及乡村传统木结构村落、老旧民居、新建装配式民居。通过统一仿真工况、量化评价指标，横向对比城乡建筑火灾风险特征、防火设计短板、数字化技术适配性；纵向对比传统规范式设计、单一数字化设计、古今复合型设计三种模式的防控效能，剖析不同建筑业态下最优的防火设计模式，针对性制定差异化的 BIM 性能化防火实施策

略，兼顾城乡建筑发展需求。

（四）行业调研法

行业调研法主要用于保障体系板块研究，调研对象覆盖建筑设计企业、消防施工单位、智慧消防运维企业、住建与消防主管部门、高校科研团队五大主体。采用线上问卷、线下访谈、实地走访相结合的方式，调研现阶段行业内 BIM 消防技术应用痛点、人才缺口、规范适配问题，收集从业人员与管理人员对性能化防火设计、行业保障体系建设的意见与建议；同时调研国内已落地数字化消防试点项目的运营现状，总结试点项目成功经验与现存问题，结合调研结果制定贴合行业实际、具备落地可行性的保障对策。

三、整体技术研究路线

本研究遵循“提出问题—理论剖析—技术攻坚—案例验证—解决问题”的闭环研究逻辑，逐层推进各项研究工作，整体技术路线划分为前期筹备、理论溯源、技术建模、案例实证、成果总结五大阶段，各阶段研究内容环环相扣，形成完整的研究体系，明确全书研究工作的实施步骤与时间逻辑。

（一）前期筹备阶段

该阶段为研究基础筹备阶段，核心工作包含三项内容：第一，梳理当代建筑复杂化、高层化、装配式发展趋势，剖析传统防火设计模式的局限性，明确研究背景与核心科学问题；第二，界定性能化防火、消防韧性、BIM 全信息模型等核心专业概念，辨析国内外相关研究现状，挖掘研究空白，确立研究创新方向；第三，划定全书四大研究板块，明确各板块研究内容、研究重难点，匹配对应的研究方法，完成整体研究框架搭建，为后续研究筑牢基础。

（二）理论溯源阶段

该阶段聚焦理论体系构建，分为古今两大研究维度：一方面深度考据传统建筑防火营造古籍与工程案例，系统归纳传统被动防火设计理念、构造手法与布局策略，完成优质营造智慧的现代化转化分析；另一方面拆解 BIM 技术内核、性能化防火设计运行逻辑，探究传统被动防火与现代数字化主动防控的融合机理，搭建消防设计范式转型的理论模型，阐释从规范驱动转向性能驱动、数字化驱动的底层动因与演化路径。

（三）技术建模阶段

该阶段是技术攻坚核心阶段，依托前文理论成果，搭建完整的数字化防火设计技术体系：首先制定多类型建筑 BIM 消防模型建模标准，优化属性数据库分类规则；其次打通 BIM 与消防仿真软件的数据传输接口，校准仿真参数，建立标准化工况设定体系；再次结合传统防火营造智慧，优化防火分区、疏散路径、防烟排烟系统设计方案；最后分别编制城市、乡村建筑专属的 BIM 性能化防火设计流程，形成可落地、可推广的标准化技术方案。

（四）案例实证阶段

该阶段以实证分析验证技术方案与理论体系的可行性，选取城乡六大类典型建筑作为实证案例：按照标准化建模流程搭建案例 BIM 模型，分别采用传统规范式、单一数字化、古今复合型三种模式开展防火设计；通过多工况仿真模拟，量化对比三种模式下的火灾风险、疏散安全冗余、空间利用率等核心指标，验证复合型防火设计模式的优越性；同时结合案例仿真结果，修正完善技术方案细节，优化差异化设计策略，提升方案适配性。

（五）成果总结阶段

该阶段为研究收尾阶段，结合理论研究、技术建模、案例实证三项成果，针对性完善行业配套保障体系，从制度规范、人才培养、产业扶持、动态监管四个层面提出优化对策；系统总结全书核心研究结论，凝练研究创新点，分析当前研究存在的局限性；结合建筑数字化、智慧消防行业发展趋势，预判未来建筑防火设计范式的迭代方向，为后续相关领域研究提供参考思路，完成整套闭环研究。

本章将全书研究内容划分为传统防火智慧、城乡消防现状、数字化消防技术、行业保障体系四大核心板块，依托多元化交叉研究方法，构建从前期筹备到成果总结的五级闭环技术路线。四大研究板块分工明确、互为补充，四类研究方法相互佐证，完整的技术路线能够有效统筹全书研究工作，既保障研究内容的系统性与完整性，也确保各项研究成果能够切实解决当代建筑消防设计范式转型过程中的实际问题。

第二章 建筑设计及其理论：传统建造智慧中的消防策略

第一节 传统建筑防火布局与构造经验解析

火灾自古以来便是威胁传统聚落与古建筑存续最主要的自然灾害之一，古代先民受制于落后的灭火设备与防灾技术，无法依靠机械化消防手段抵御火灾侵害。在此背景下，古人依托地域气候特征、本土材料特性与长期营造经验，逐步摸索出一套以被动防御为核心、适配木构建筑体系的防火营造体系。该体系涵盖宏观聚落规划、中观院落布局、微观构件构造多个维度，区别于现代主动消防设备灭火模式，侧重从空间隔离、构造阻断、环境适配层面降低火灾发生概率、抑制火势蔓延。

一、传统建筑平面布局的防火隔离营造思路

平面布局是传统建筑被动防火体系的顶层设计，也是先民防火思维最直观的体现。相较于后期附加式防火构造，科学的平面布局能够从根源上划分火源范围、切断火势扩散通道，适配古民居、庙宇、祠堂等不同类型建筑的使用特征，形成适配聚落整体与单体建筑的双层防火隔离体系，是传统防火营造体系的基础支撑。

（一）古民居聚落街巷分区营造逻辑

我国南北地域古民居聚落形态差异显著，但街巷布局均兼顾交通通行、日常排水与火灾防控多重功能，形成分级分区的防火管控模式。南方徽州、赣南、江浙山地聚落多密集型布局，建筑排布紧凑、木质外立面占比高，火灾连锁蔓延风险极高，因此聚落内部普遍采用“主街一支巷一里弄”三级街巷体系。主干道宽度普遍维持在四至六米，不仅承担聚落对外交通功能，同时作为大型防火隔离带，能够阻隔片区之间的明火扩散；次级巷道宽度控制在两米至三米之间，将连片聚落切割为若干独立组团，单个组团建筑面积严格控制在五百平方米以内，从空间层面划定防火单元，降低连片火灾发生概率。北方黄土高原、华北平原古民居聚

落布局相对松散，街巷尺度更为开阔，街巷与闲置空地、绿化农田相互穿插，天然形成多层次防火缓冲带。除此之外，南北传统聚落均遵循“明火远离密集居住区”的布局原则，将磨坊、灶台、柴房等高明火风险功能用房统一布置于聚落边缘或组团下风口，依托街巷完成火源分区管控，最大化降低明火对居住区域的威胁。这种以街巷为骨架、组团为单元的布局模式，无需额外增设防火构件，依托基础空间规划即可实现低成本防灾，彰显古代先民因地制宜的防灾智慧。

（二）合院体系院落分隔防火模式

合院形制是我国传统民居最主流的空间形态，涵盖北方四合院、南方天井院、西南一颗印等分支类型，历经千年发展覆盖全国绝大多数地域。合院建筑以院落、天井为核心围合展开，这类开放虚空空间不仅是建筑采光通风、人际交往的核心场所，更是单体建筑内部最重要的防火分隔载体。北方四合院采用轴线对称的多进式布局，前院、中院、后院层层分隔，院落开间普遍大于六米，空旷区域无任何可燃构件，能够有效阻断火势在厢房、正房、倒座之间横向蔓延；南方天井院受用地限制，院落尺度偏小，但竖向天井形成独特的负压通风空间，除基础通风功能外，可隔绝房间之间的明火互通。从营造细节来看，传统合院建筑严格区分功能空间，厨房、柴薪储存间等高危明火空间，独立设置于边角附属用房之内，与主居住用房以院落进行隔离，形成物理缓冲区域。同时，多进式合院利用围墙、门洞分割多个子院落，即便单一子院落发生火情，虚空院落与砖石围墙可形成双重屏障，避免火势纵向扩散至整个建筑，构建起适配民居日常使用的内部防火屏障。

（三）古庙宇公共建筑功能分区策略

庙宇、祠堂、会馆等传统公共建筑，相较于普通民居，具备人员集散量大、明火使用频繁、可燃构件密集三大特征，火灾风险等级远高于常规民居建筑，其平面防火布局逻辑也更为系统化、精细化。此类公共建筑普遍采用纵向多进式布局，沿中轴线依次排布山门、献殿、主殿、配殿等功能单元，不同单元之间以庭院、高墙、廊道进行硬性分隔，每个殿堂均可视为独立防火单元。祭祀焚香作为公共建筑主要明火来源，古人专门将焚香祭祀区域与日常休憩、储物区域进行剥离，集中设置专属祭祀平台，并且在祭祀区域周边增设砖石围护墙体，规避香火引燃木质梁柱与屋面构件。与此同时，古代营造者充分结合应急疏散需求，在公共建筑四周设置环形疏散通道，通道墙体全部采用砖石砌筑，既可以作为防火隔

离带，也能在火灾发生时疏导集散人群。多数古庙宇还会在殿前庭院设置放生池、蓄水池，兼顾景观功能与消防应急取水需求，形成“分区隔离—火源管控—应急储备”三位一体的公共建筑防火布局模式，全方位适配高风险建筑的防灾需求。

二、传统建筑专用防火构造的物理防火机理

受木材易燃属性限制，仅依靠平面布局无法完全规避火灾隐患，古人结合长期火灾处置经验，研发出一系列适配木构体系的专项防火构造。此类构造依托乡土建材自身性能，通过物理阻隔、热量削弱、烟气疏导等方式，弥补平面布局的防火短板，针对性阻断火势横向、纵向蔓延路径，构成传统建筑被动防火体系的第二道核心防线。

（一）封火山墙火势阻断机理

封火山墙俗称马头墙，是我国江南、闽粤地区传统建筑最具代表性的专用防火构造，也是传统被动防火技术的标杆性成果，广泛应用于密集型民居与庙宇建筑。从构造形制来看，封火山墙以青砖、夯土等不燃材料砌筑，墙体顶部高出屋面屋脊一米至三米不等，顺着屋面坡度呈现阶梯式造型，能够完整包裹建筑屋面两侧边缘。其核心防火机理分为两个层面，第一，横向阻隔作用，高出屋面的不燃墙体可直接阻断相邻建筑屋面之间的明火窜燃，解决密集聚落建筑间距过小、火势连片蔓延的痛点；第二，烟气阻隔作用，火灾中高温烟气极易顺着屋面瓦片缝隙扩散，封火山墙可封堵烟气扩散路径，削弱热辐射对相邻建筑木质构件的烘烤作用。结合古建实测数据来看，完整的封火山墙可抵御一千摄氏度左右的高温明火，耐火极限可达三小时以上。除防火功能外，封火山墙还兼具防风、遮阳、装饰功能，实现单一构造多功能复用，契合传统建筑低成本、集约化的营造理念。

（二）隔火廊道与防火巷缓冲机制

隔火廊道与防火巷是衔接聚落与单体建筑的过渡型防火构造，本质上属于无燃缓冲空间，其设计理念与现代建筑防火间距、避难走道高度契合。防火巷主要应用于聚落层面，设置于相邻两栋建筑之间，巷道两侧直接采用建筑砖石山墙作为围护结构，无木质门窗、屋檐等可燃构件，依靠空旷无燃空间切断建筑之间的火势蔓延路径；隔火廊道多用于单体合院建筑内部，连接不同功能院落，廊道围护墙体以砖石为主，屋面采用青瓦铺设，摒弃可燃木质围护材料。从防火机制角度分析，二者核心原理均为“以空阻火”，利用氧气稀薄的空旷区域降低明火扩

散能力，同时无燃围护结构可抵御高温烘烤。在应急层面，防火巷与隔火廊道可作为专属疏散通道，区别于日常人行通道，火灾发生时能够规避烟火侵扰，保障人员快速撤离，同时可供消防人员近距离开展灭火作业，兼顾防火隔离与应急疏散双重价值。

（三）独立天井排烟与分隔原理

独立天井是南方天井院民居的核心标志性构造，起初用于解决密集建筑采光通风难题，后续逐步衍生出防火分隔、被动排烟的附加功能，是传统建筑中兼具舒适性与安全性的复合型构造。天井四周由砖石墙体围合而成，内部无固定隔断，竖向贯通建筑上下楼层。在防火分隔层面，天井将围合建筑拆解为多个独立房间单元，房间门窗统一朝向天井开设，明火被限制在单一房间内部，难以横向穿透天井引燃其他房间；在排烟散热层面，天井依托竖向高差形成天然烟囱效应，火灾产生的高温烟气密度较低，可顺着天井快速向上排出建筑内部，有效降低室内烟气浓度与环境温度，延缓火势发展速度。除此之外，传统天井底部普遍设置排水沟与蓄水缸，蓄积日常雨水，既可以用于日常清扫，也可直接用于初期火灾扑救，形成排烟、分隔、蓄水一体化的被动防火构造。

三、传统建筑整体性防火规划逻辑

传统建筑防火设计并非布局、构造的简单叠加，古人在长期营造过程中，总结出顺应自然环境、贴合人居习惯的整体性规划逻辑。该逻辑跳出单一构件与空间的局限，统筹气候风向、材料属性、人居动线三大要素，形成以被动防御为主、火源管控为辅、自然适配为核心的朴素防火思维，具备极强的系统性与科学性。

（一）顺应自然风向的被动排烟规划

古代先民无机械排烟设备，因此所有建筑整体布局均优先适配区域主导风向，依托自然风力完成日常通风与火灾工况下的被动排烟。我国季风气候特征显著，夏季主导东南风、冬季主导西北风，绝大多数传统建筑均采用坐北朝南的基础朝向，主入口、天井、高侧窗等通风开口朝向主导风向布置，构建贯穿室内外的线性通风廊道。正常工况下，通风廊道可优化室内空气质量、降低室内湿度，延缓木质构件腐朽老化；火灾工况下，自然风可快速带走室内高温烟气，降低室内温度，削弱明火燃烧强度。北方开阔型合院依托横向庭院引导穿堂风，南方密集型天井院依托竖向天井引导垂直气流，二者形式不同但底层逻辑一致，均以自然气

候为基础，无需额外消耗能源即可实现排烟散热，充分践行“天人合一”的传统营造哲学。

（二）分级分区的全维度火源隔离逻辑

火源隔离是传统防火规划的核心内核，古人按照“宏观组团—中观建筑—微观房间”三级管控模式，搭建全方位火源隔离体系，从源头降低火灾发生概率。宏观组团层面，借助主干道、农田、防火巷划分独立防火组团，严禁高明火作业区域集中布置，实现组团之间的风险隔离；中观建筑层面，依托院落、高墙、廊道分割多个防火单元，将明火用房与居住用房物理剥离，禁止明火区域与可燃构件直接接触；微观房间层面，灶台、香炉等明火点位周边，统一铺设砖石、素土等不燃材料，规避明火直接引燃木质地面与墙体。该分级隔离逻辑与现代建筑防火分区、防烟分区管控体系高度契合，区别仅在于现代消防依托规范条文强制执行，传统防火依托营造经验长期落地，足以印证传统防火规划思维的前瞻性与科学性。

（三）适配人居动线的应急疏散规划

防火规划的最终目标是保障人居安全，除阻断火势蔓延外，应急疏散体系规划同样是传统防火设计的重要组成部分。传统建筑疏散规划遵循“多向通达、分级集散、平灾共用”三大原则，所有疏散空间同时服务日常生活与火灾应急。从动线层级来看，房间门窗为一级疏散出口，院落天井为二级集散缓冲区，街巷主干道为三级外部疏散通道，三级动线层层衔接，形成闭环疏散网络。为规避火灾封堵单一通道带来的逃生风险，传统合院建筑每个房间均设置两个及以上朝向不同院落的出入口，打破单向逃生局限。同时，所有疏散通道围护结构全部采用砖石、夯土等不燃材料，从构造层面保障疏散通道在火灾工况下的完整性，防止通道坍塌、烟气倒灌等次生灾害，兼顾实用性与安全性。

传统建筑依托科学分级的平面布局、多元化专项防火构造、顺应自然的整体性规划逻辑，构建起适配古代木构建筑体系的被动防火系统。该系统摒弃复杂机械设备，以乡土材料与空间设计为核心，兼顾经济性、适配性与生态性，既解决了古代建筑火灾频发的现实痛点，也沉淀了本土化、特色化的防灾营造思维，可为当代古建筑修缮、乡村民居新建项目提供本土化设计参考，弥补现代标准化消防设计地域适配性不足的短板。

第二节 乡土材料与构造体系的防火性能再认知

乡土材料是传统建筑营造的物质载体，其中木构、夯土、砖石三类材料应用范围最广，决定了传统建筑防火构造的设计形式与性能上限。在现代建筑行业发展进程中，混凝土、钢材等工业化建材逐步取代乡土材料，学界普遍片面认定乡土材料防火性能落后，忽视夯土、砖石的不燃属性以及传统复合构造的被动阻燃价值。基于此，本节以现代消防检测标准为依据，量化测定主流乡土材料防火参数，剖析复合型防火构造的作用机制，横向对比乡土材料与工业化建材的优劣，挖掘低成本乡土阻燃构造在当代建筑领域的应用潜力。

一、主流乡土建材燃烧特性与耐火性能量化分析

不同乡土建材理化属性差异较大，燃烧等级、热释放速率、耐火极限等核心防火参数分化明显。木材为可燃材料，夯土、砖石为不燃材料，古人通过差异化搭配各类建材，取长补短，平衡结构受力、空间使用与防火安全需求。结合 GB 8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》相关检测标准，可精准量化各类乡土建材的防火性能，明确其阻燃优势与应用短板。

（一）木质建材燃烧性能量化特征

木质建材是传统建筑的主体结构材料，涵盖杉木、松木、楠木等常用品类，整体燃烧性能等级为 B2 级可燃材料，存在天然火灾隐患。从燃烧机理层面分析，木材内部含有纤维素、木质素等可燃有机物，高温环境下易发生热解反应，释放可燃性气体，遇明火后快速燃烧，并伴随有毒烟气排放。经标准化火灾工况检测，常规实木板材热释放速率峰值区间为 140—260kW/m²，薄型木构件耐火极限不足三十分钟。但木质建材防火性能具备极强的可塑性，构件截面尺寸、含水率、表面处理工艺均可改变其耐火能力。大截面实木柱在未经处理的前提下，两百毫米规格方柱耐火极限可达一点五小时以上；含水率高于百分之二十的实木构件，燃烧启动阈值显著提升，明火引燃难度大幅增加。同时木材燃烧会形成碳化保护层，隔绝氧气与内部木质基材，延缓燃烧进程，该特性也是大型古木构建筑能够抵御短时火灾侵袭的核心原因。

（二）夯土建材防火性能量化特征

夯土建材取材于本土黄土、砂土，辅以草筋、石灰等辅料拌合夯实，包含素

土夯土、三合土夯土、草筋夯土三大品类，所有品类燃烧性能等级均达到 A 级不燃标准。夯土材料内部以无机矿物成分为主，高温环境下不会发生热解燃烧，无有毒烟气释放，仅极端高温下会出现表层开裂、失水硬化等物理变化。耐火极限与墙体厚度、材料配比呈正相关，一百二十毫米厚素土墙体耐火极限可达两小时，两百四十毫米厚墙体耐火极限突破四小时；添加石灰、砂石的三合土密实度更高，耐火极限相较于素土夯土提升百分之二十左右。草筋夯土内部虽含有植物纤维，但纤维完全被无机土体包裹，无法接触氧气，不会出现燃烧现象，同时可提升墙体抗裂性能，是适配乡村民居的低成本防火围护材料。

（三）砖石建材防火性能量化特征

青砖、片石、块石等砖石建材，是传统建筑防火围护的专用材料，理化性质稳定，燃烧等级统一为 A 级不燃材料，综合防火性能优于木材与夯土。砖石材料耐高温能力极强，一千两百摄氏度高温工况下无熔融、燃烧现象，仅局部区域出现细微裂纹。在标准火灾测试工况下，一百二十毫米厚青砖墙体耐火极限不低于三小时，两百四十毫米厚青砖实墙耐火极限可达六小时以上；天然石材热传导系数极低，隔热阻燃能力突出，二十毫米薄板石材即可满足两小时基础耐火要求。传统砖石墙体配套糯米灰浆、石灰砂浆进行砌筑，砂浆能够填充砌体缝隙，阻断烟气渗透路径，进一步强化墙体密闭性与防火分隔能力，广泛应用于封火山墙、防火隔墙等高优先级防火构造之中。

建材分类	燃烧性能等级	热释放速率峰值 (kW/m²)	标准工况耐火极限 (h)	核心防火特征与适配场景
实木构件（松木 / 杉木）	B2 级（可燃）	140-260	1.0-1.5 (200mm 截面)	表面碳化阻燃，适配建筑梁柱主体结构，需做表层防火处理
素土夯土墙体	A 级（不燃）	0	2.0-4.0(120—240mm)	零烟气排放，取材便捷成本低廉，适配乡村民居外围护墙体
三合土夯土墙体	A 级（不燃）	0	2.5-5.0(120—240mm)	密实度高抗风化，耐火性能优异，适配高等级防火分隔墙体
青砖砌筑墙体	A 级（不燃）	0	3.0-6.0(120—240mm)	结构稳定性强，抗高温冲击，适配封火山墙、防火巷围护
天然石材板材	A 级（不燃）	0	≥ 2.0（20mm 薄板）	热辐射阻隔能力突出，适配灶台围护、屋面防火边角构件

二、传统复合型防火构造作用机制解析

单一乡土建材存在明显应用短板，木材易燃、夯土强度偏低、石材自重过大。古人结合各类材料优缺点，研发泥裹木、砖石围护等复合型防火构造，通过可燃材料与不燃材料组合搭配，实现优势互补，从隔热、隔氧、阻烟三个维度延缓火势发展，弥补单一材料的性能缺陷，构建适配木构体系的复合防火屏障。

（一）泥裹木构造阻燃作用机制

泥裹木又称麻刀灰裹木，是古代木构建筑最基础、应用最广泛的复合型防火构造，核心做法为在木质梁柱、檩条表层涂抹十至二十毫米厚的石灰麻刀灰层，形成完整密闭防护壳。该构造防火机制分为三层，其一为隔氧防护，无机灰层完全包裹木质基材，隔绝外部氧气，从根源阻止木材发生热解燃烧；其二为隔热降温，石灰灰浆热传导系数极低，能够削弱外部高温热辐射，避免内部木材温度达到燃点；其三为烟气封堵，致密灰层可封堵木材表面缝隙，防止内部可燃气体外泄，同时阻断外部烟气侵入室内。经过泥灰包裹处理的木构件，耐火极限可提升一倍以上，同时灰层具备防潮、防虫、防腐附加功能，可延长木构件使用寿命，实现防火与耐久双向增益。

（二）砖石围护复合构造运行原理

砖石围护复合构造采用“外砖内木”的组合形式，外围以青砖、块石砌筑封闭围护墙体，内部保留传统木构框架承担受力功能，兼顾木构空间优势与砖石防火优势。该构造主要从火势阻断、热辐射阻隔、结构防护三个层面发挥作用。外围砖石墙体作为第一道防火防线，可抵御外部明火侵袭，阻断横向火势蔓延；低导热系数的砖石材料能够削弱火场热辐射，避免内部木质框架被高温烘烤引燃；火灾工况下，砖石墙体可承接高温冲击，保护内部木构主体结构，降低建筑整体坍塌概率。部分传统建筑还采用空斗墙砌筑工艺，墙体内部空腔填充素土、细砂等不燃材料，进一步提升墙体隔热阻燃能力，适配庙宇、大型民居等高等级防火需求建筑。

（三）复合构造多维度协同防火效应

传统复合型防火构造并非独立运行，在完整建筑体系内部可形成协同联动效应，构建多层次立体化防火网络。从功能互补角度，泥裹木负责构件本体防火，砖石围护负责建筑整体围护防火，天井、廊道负责烟气疏导，多类构造各司其职，

形成构件—空间—建筑一体化防护体系；从层级防护角度，建筑外部砖石墙体为一级防线，内部泥裹木防护层为二级防线，虚空院落天井为三级缓冲防线，层层递进提升建筑防火冗余；从被动适配角度，所有复合构造均无需电力、机械等外部能源支撑，依靠材料自身理化属性完成防火作业，适配偏远乡村、古建保护区等设备铺设受限区域，规避主动消防设备故障、断电带来的安全隐患。

三、乡土材料与现代建材对比及现代化应用潜力

工业化建材凭借标准化、高强度的优势，成为现代建筑防火设计的主流选择，但同时存在碳排放高、造价昂贵、地域适配性差等短板。与之相比，乡土材料防火性能并不逊色于常规工业化建材，且具备低成本、低碳环保、取材便捷等独特优势，尤其适配乡村新建建筑、历史街区更新、古建修缮等特殊场景，具备极高的推广应用价值。

（一）乡土材料与现代建材防火性能横向对比

结合同等厚度标准工况检测数据，A级不燃类乡土材料防火性能整体优于普通工业化建材。两百四十毫米厚素土、青砖墙体耐火极限远超同规格混凝土墙体，且热传导系数仅为混凝土三分之一，隔热阻燃效果更佳；在烟气排放层面，夯土、砖石高温下零有毒烟气释放，优于阻燃塑料、有机保温板等现代复合型防火材料。木质乡土材料虽属于可燃材料，但通过泥裹木、表层碳化处理后，耐火极限可满足低层建筑防火规范要求，造价远低于防腐阻燃实木、钢结构构件。从综合性能来看，乡土材料唯一短板为结构承载力偏弱，无法适配高层、超高层建筑主体结构，但完全能够满足低层民居、中小型公共建筑的营造需求。

（二）乡土材料现代化应用核心优势

相较于工业化防火建材，乡土材料在特定应用场景下具备四大不可替代优势。经济层面，乡土材料可就地开采、就地加工，无需长途运输与工业化高温烧制，材料综合造价仅为工业化建材的百分之二十至百分之三十，能够大幅降低乡村建筑防火改造成本；生态层面，夯土、原木、石材均为天然可再生材料，生产环节碳排放极低，废弃后可直接回归自然，契合绿色低碳建筑发展理念；文化层面，乡土材料自带地域肌理特征，能够保留传统建筑风貌，解决现代防火改造千篇一律、破坏地域文脉的行业痛点；施工层面，乡土材料营造工艺简单，普通乡村工匠即可完成施工作业，无需专业大型机械设备，适配基层乡村建设施工条件。

（三）低成本本土阻燃构造落地路径

结合我国建筑行业发展现状，乡土阻燃构造可从三类场景完成现代化落地。第一，乡村民居升级改造，针对老旧民居木质构件易燃、防火分区混乱等问题，复刻泥裹木、砖石矮墙等传统构造，以极低成本完成防火升级，替代高价工业化防火板材；第二，地域特色公共建筑设计，乡镇文化礼堂、民俗展馆等低层公共建筑，采用夯土围护、青砖隔墙等乡土构造，兼顾防火安全与地域文化展示功能；第三，历史街区更新修缮，在古城、古村落更新项目中，以传统防火构造替代硬质防火卷帘、防火涂料，平衡消防安全与风貌保护需求。同时可结合现代材料技术改良乡土建材，在夯土中添加微量纤维、水泥提升结构强度，在传统灰浆中添加无机阻燃剂，进一步放大乡土构造的防火性能。

各类乡土建材性能分层明确，夯土、砖石凭借 A 级不燃属性成为优质围护防火材料，大截面改性木材可作为低层建筑主体结构材料，泥裹木、砖石围护等复合型构造，可全方位提升木构建筑的火灾抵御能力。相较于现代工业化建材，乡土材料经济性、生态性、文化性优势突出，通过现代化工艺改良与应用场景适配，能够有效破解乡村建筑防火薄弱、历史建筑改造风貌失衡等行业难题，推动传统乡土营造智慧与现代消防体系深度融合。

第三节 传统建造智慧在现代建筑设计中的传承路径

历经数千年发展而成的传统建筑防火营造智慧，凝结古代先民应对火灾灾害的生存经验与营造哲学，其不仅包含具象化的防火构件与空间布局模式，更蕴藏适配本土气候、适配低层木构建筑的被动防灾底层逻辑。这类智慧并不依附于古代落后的建材与施工工艺，具备极强的剥离性与移植性，能够适配当下多元化的建筑设计场景。现阶段国内相关研究普遍存在重考据、轻落地的问题，未能搭建完整的现代化转化体系，导致优质传统营造技艺长期闲置。基于此，本章节从内核提炼、场景融合、数字留存三大维度出发，系统化梳理传统防火智慧传承路径，结合现行国家防火规范完成手法革新，依托数字化技术完成技艺长效留存，为现代建筑消防设计补充本土化设计思路。

一、传统防火设计内核提炼与现代化手法转化

传统建筑防火体系由平面布局、围护构造、应急规划等多部分协同组成，表层的建筑形制、施工材料具备明显的时代局限性，无法直接照搬至现代建筑项目之中。但深层的设计内核与防灾思维具备普适性，不受时代、材料、结构形式约束。想要实现传统智慧现代化落地，首要工作便是剥离古代营造模式的落后属性，提炼通用性设计内核，并结合现代施工技术、消防规范完成手法转译，打通理论与实践之间的壁垒。

（一）平面布局类防火内核萃取

结合前文对于传统聚落、民居、公共建筑平面布局的研究，结合火灾蔓延规律与现代消防底层逻辑，可将传统平面防火设计内核归纳为分级分区、空界隔离、多元疏散三项核心内容。分级分区起源于古代聚落街巷划分与合院院落分割模式，核心内涵为依托线性空间、硬质墙体将整体建筑拆解为若干独立单元，从空间层面划分防火分区，将火情限制在单一单元内部，从源头遏制火势全域扩散；空界隔离则是以虚空无燃空间作为防火缓冲载体，替代高成本、强破坏性的硬质防火墙，利用庭院、天井、巷道等空置区域隔绝明火与高温烟气，兼顾防火功能与建筑空间美学；多元疏散理念打破单一逃生通道的设计桎梏，依托多向化出入口、多层级集散空间，搭建平灾共用的疏散动线，有效提升火灾工况下人员逃生效率。上述三项内核贯穿古代各类建筑营造全过程，也是现代防火分区、疏散设计的底层基础，可广泛适配混凝土、钢结构、现代木构等多种建筑结构体系。

（二）隔离构造类设计内核总结

传统防火专项构造种类丰富，涵盖封火山墙、泥裹木、防火巷、隔热天井等多种形式，适配不同地域、不同类型古建筑的防火需求。透过具象化的构件形态，可提炼出被动优先、一物多用、层级设防三大构造设计内核。被动优先指以材料物理属性与空间构造为核心防火载体，弱化对主动灭火设备的依赖，降低建筑消防运维成本，适配设备铺设受限的偏远区域与文物保护区；一物多用主张优化构件综合属性，让单一构造同时承载防火、通风、装饰、排水等多项功能，规避专用防火构件功能单一、资源浪费、破坏建筑风貌的行业痛点；层级设防遵循循序渐进的防护思维，由外至内设置多层级防火防线，外部依托墙体、巷道抵御外部火情，内部依托复合构造保护主体构件，双重防护模式提升建筑整体防火冗余，

降低火灾损毁风险。

（三）适配现代规范的手法转化

在内核萃取的基础上，结合《建筑设计防火规范》（GB 50016-2014）相关要求，摒弃古代原始施工工艺与老旧乡土材料，完成传统防火思维现代化手法转化。在分区布局层面，将传统街巷、院落分割模式，转化为现代建筑总平面、单体楼层、室内空间三级分区体系，利用市政道路、景观中庭、下沉庭院替代传统巷道与天井，完成防火单元划分；在被动防护层面，改良泥裹木构造，采用无机环保防火砂浆替代传统麻刀灰，包覆钢结构与现代实木构件，在不改变构件外观的前提下提升耐火极限；在排烟设计层面，复刻天井烟囱效应，在大型公共建筑内部设置通风中庭与竖向通风井，作为机械排烟系统的补充结构，实现被动式自然排烟；在隔离构造层面，简化封火山墙形制，优化为模块化预制墙板，应用于建筑屋面与外立面，实现相邻建筑之间的火势阻断。转化后的设计手法完全契合现行消防规范，适配现代工业化施工模式，能够直接应用于各类新建、改造类建筑项目。

二、传统防火空间逻辑在现代工程项目的融合应用

经过现代化转化的传统防火设计手法，只有落地于实际工程项目之中，才能真正发挥其应用价值。我国建筑项目类型繁杂，不同场景的场地条件、造价预算、规范约束、防火需求存在明显差异，不可采用统一化的套用模式。结合国内建筑行业发展现状，乡村新建民居、城市老旧区域更新、地域特色公共建筑是最适配传统被动防火智慧的三大场景，结合场景特征针对性融合传统空间逻辑，能够最大化发挥传统营造智慧低成本、高适配、原生态的应用优势。

（一）乡村新建民居场景适配方案

乡村民居本身脱胎于传统合院建筑体系，低层布局、场地自由度高、造价敏感度强三大特征，与传统被动防火体系高度契合，是传统营造智慧落地的最优场景。在整体规划层面，新建乡村民居可沿用中小型合院与内天井布局模式，以内部庭院划分基础防火单元，将厨房、柴火储存间、养殖附属用房等明火高危区域，统一布置于建筑下风口位置，与主居住空间形成物理隔离；在围护构造层面，外围护墙体优先选用改良三合土、青砖等本土化不燃建材，既降低建材采购与运输成本，又能依托材料本身属性搭建基础防火屏障；在主体构件防护层面，对室内

木质梁柱、门窗框架采用无机防火砂浆包覆工艺，复刻古代泥裹木防火模式，以极低造价完成构件阻燃升级；在应急配套层面，延续古代天井蓄水、庭院蓄水池的设计思路，将景观水池、生活蓄水池纳入消防应急体系，作为小型火灾初期扑救的核心水源。该方案无需配置复杂的自动喷淋、火灾报警系统，适配乡村经济水平与运维能力。

（二）城市更新改造项目优化策略

城市老旧小区、历史文化街区等更新类项目，普遍存在防火分区面积超标、疏散通道狭窄、消防设施老化、风貌改造同质化等共性难题，常规硬质防火改造手段易破坏原有街巷肌理与建筑外立面。将传统防火空间逻辑融入更新项目，可有效平衡消防安全、风貌保护与改造成本。在防火分区优化方面，摒弃大面积拆除墙体、增设防火墙的改造模式，盘活项目内部闲置前厅、废弃小院、楼道夹缝等闲置空间，打造微型防火缓冲带，拆分超大防火单元；在疏散体系升级方面，借鉴传统合院多向通达的动线设计理念，打通楼栋侧边闲置通道，构建环形疏散路网，打破老旧小区单向逃生的安全隐患；在风貌防护层面，全面淘汰外露式防火卷帘、彩色防火涂料等违和构件，采用隐形化复合夯土板材、隐蔽式防火隔断，在完成防火升级的同时，完整保留历史街区原始建筑风貌。同时可结合街区原有排水系统，增设分布式蓄水点位，完善初期火灾应急扑救体系。

（三）地域性公共建筑设计模式

乡镇文化礼堂、民俗展馆、文旅服务中心等低层地域性公共建筑，兼具人员集散、文化展示、公共服务多重功能，对消防安全、建筑美学、文化表达均有着较高要求。此类建筑设计过程中，可深度融合传统防火空间逻辑，实现防火功能与文化赋能双向统一。整体布局上，采用多进式合院布局形制，以大小不一的庭院分割防火分区，分散高密度人流，解决大型公建火灾疏散难度大的痛点；造型设计上，提取不同地域传统防火构造的美学符号，江南地区优化改良马头墙造型作为屋面装饰与防火隔断，岭南地区融合冷巷与天井组合结构优化被动排烟性能，北方地区依托对称式院落布局完善整体防护体系；构造设计上，采用预制复合砖石板材作为外围护结构，兼顾防火分隔、外立面装饰、地域文化展示三重功能。除此之外，可将消防蓄水设施与景观设计相结合，复刻古庙宇放生池设计思路，打造景观应急一体化水池，完善公共建筑双层消防保障体系。

三、基于 BIM 数字化工具的传统防火构造长效留存

传统防火营造技艺多依靠工匠师徒口传心授进行传承，文字记载碎片化、工艺数据缺失问题突出，伴随资深古建工匠老龄化流失，大量小众地域特色防火构造濒临失传。数字化留存是破解技艺断层难题、实现营造经验活态传承的核心手段。依托 BIM 数字化设计工具，可完成传统防火构造高精度建模、参数化优化、模块化封装与云端共享，将抽象的营造经验转化为标准化数据资源，为行业设计、学术研究、古建修缮提供长效支撑。

（一）传统防火构造高精度孪生建模

高精度三维建模是数字化留存的基础环节，建模对象涵盖封火山墙、泥裹木、独立天井、防火巷道、复合夯土墙等全部核心传统防火构造。项目前期依托三维激光扫描、实地测绘两种方式，采集构件外观尺寸、材料配比、拼接工艺、适用环境等全方位数据，弥补传统二维图纸无法展示施工细节的短板。随后依托 Revit 数字化建模平台，搭建 1:1 实体孪生模型，模型内部不仅录入构件几何形态参数，同时绑定耐火极限、热传导系数、适配建筑类型、施工工序等性能数据。建模完成后，邀请资深古建营造工匠与古建消防领域专家开展双重校核，修正构件拼接缝隙、灰层厚度等细微误差，保障数字化模型与实体构造完全一致，精准还原古代防火构造的营造精髓。

（二）防火构造参数化与模块化开发

静态三维模型仅能完成技艺留存，无法直接赋能现代化设计工作，因此需要在模型基础上开展参数化与模块化开发。参数化开发以拆解构造核心变量为核心，以封火山墙为例，将墙体高度、阶梯层数、倾斜角度、板材厚度设置为可调变量，设计人员可结合项目防火等级、场地尺寸、建筑风格，自动生成适配的定制化模型；以泥裹木构造为例，可自由调节防护灰层厚度、砂浆配比，适配不同耐火等级的构件防护需求。模块化开发则按照功能属性，将所有防火构造划分为防火分隔、被动排烟、构件防护、应急疏散四大基础模块，封装为标准化构件族库。设计人员在方案创作阶段，可直接调取对应模块组合使用，大幅降低传统智慧落地的技术门槛，适配现代建筑高效化、标准化的设计节奏。

（三）云端共享型资源数据库搭建

为扩大传统防火智慧传播范围，实现行业共享，可整合参数化构件模型、材

料防火检测数据、落地应用案例、标准化营造教程，搭建云端一体化传统防火构造资源数据库。数据库划分为四大功能板块，模型板块收录全国南北不同地域的特色防火构造参数化模型；数据板块汇总各类乡土建材、复合防火构造的耐火极限、燃烧等级等检测数据；工艺板块图文结合讲解传统构造施工流程与现代化改良工艺；案例板块收录民居改造、古建修缮、公建设计三类落地标杆项目。数据库面向建筑类高校、设计院、文旅管理部门、乡村建设团队免费开放，同时建立动态更新机制，持续收录新增特色构造与改良工艺，形成常态化更新模式，全方位推动传统防火营造智慧普及。

传统建造智慧的现代化传承是一项系统化工程，需完成内核萃取、手法转化、场景落地、数字留存全流程闭环工作。通过剥离传统营造模式的时代桎梏，提炼普适性防火设计内核并转化为适配现代规范的设计手法，针对性融入乡村民居、城市更新、地域性公建三大主流建设场景，同时依托 BIM 数字化技术完成技艺永久性留存与共享，既有效解决传统营造技艺失传的行业痛点，也能够弥补现代标准化消防设计同质化、地域适配性弱的短板，进一步丰富我国低层建筑、历史建筑的消防设计体系，推动传统乡土营造文化与现代建筑消防行业深度融合。

第四节 基于文化延续性的消防设计创新

消防设计的核心目标包含生命安全防护、建筑本体保护、地域文化延续三个层面，但现阶段国内多数建筑消防设计工作，过度侧重火情防控与人员疏散两项硬性指标，忽视历史建筑、文旅建筑、特色民居的文化属性。在文物修缮与老旧街区更新工程中，部分设计人员机械套用通用消防规范，采用一刀切式的硬质防火改造方案，加装突兀的防火墙、外露式消防设备、标准化防火门窗，严重破坏建筑原生肌理与地域风貌，造成不可逆的文化资源损耗。基于文化延续性视角，重新界定特殊建筑消防设计评价标准，平衡防火安全与风貌保护之间的矛盾，转译传统防火设计语言，搭建风貌适配型性能化防火设计体系，能够实现消防安全、文化传承、空间功能三者协同发展，助力建筑消防设计多元化转型升级。

一、文物风貌保护与现代防火安全的平衡策略

文物古建筑与历史遗存建筑具备不可再生的历史价值、艺术价值与文化价值，

此类建筑木质可燃构件密集、消防基础设施薄弱、改造约束条件严苛，消防安全升级与风貌保护之间的矛盾最为突出。片面追求消防安全会损毁文物原真性，一味固守风貌禁止任何改造则会埋下重大火灾隐患。想要破解二者之间的固有矛盾，需要确立专属改造原则，按照文物等级实行分级分类管控，推广隐形可逆型防火改造技术，在最小干预的前提下完成消防安全升级。

（一）文物建筑防火改造底层原则

结合《文物保护工程管理办法》与现行建筑防火相关规范，结合文物建筑的特殊属性，明确四项适配文物改造的基础原则。原真性保护原则要求所有防火改造措施不得改动建筑主体承重结构、外立面形制、建材肌理与内部空间格局，最大限度保留文物建筑历史原貌与时代印记；最小干预原则禁止大规模拆改、重构建筑空间，优先采用表层防护、外部隔离、无感监测等轻量化改造方式，严控改造施工范围；性能适配原则摒弃机械式规范套用模式，根据建筑结构类型、文物等级、人员流动强度开展火灾风险评级，制定个性化防火性能目标；可逆性设计原则规定所有附加防火构件、阻燃涂层、监测设备均可无损拆除，拆除后建筑可完全恢复原始状态，规避永久性改造带来的文化破坏问题。四项原则互为补充，为文物建筑防火改造划定清晰红线。

（二）分级分类差异化改造方案

不同等级、不同结构的文物建筑，火灾风险等级、改造权限、保护价值存在较大差异，统一化改造方案无法适配所有项目，需实行分级管控、分类施策的改造模式。从文物等级维度进行划分，国家级、省级重点文物保护建筑以被动隐形防护与火情监测为主，仅针对灶台、香炉等高危明火点位开展局部阻燃处理，严禁增设硬质防火隔墙、外露消防设备；市县级文物保护建筑可在不改动外立面的基础上，优化内部疏散通道，隐蔽式增设小型灭火设备；一般性历史风貌建筑约束条件适当放宽，可参照低层民用建筑防火规范，全方位完善主动与被动消防体系。从结构维度划分，纯木构古建筑重点优化构件阻燃性能，采用传统无机灰浆替代化学防火涂料；砖石、夯土类文物建筑依托自身不燃属性，重点完善疏散动线与应急取水系统，简化围护防火改造内容。

（三）隐形可逆型防火改造技术应用

隐形化、可逆化防火改造技术，是平衡文物风貌与消防安全最直接的技术载体，能够完美适配各级文物建筑升级改造需求。目前行业内适配古建场景且技术

成熟的改造技术主要分为三类，其一为无机隐形阻燃涂层技术，以高岭土、生石灰、矿物阻燃剂为核心原料，调配透明水性阻燃涂层，涂抹于木质构件表层后不会改变木材颜色与纹理，同时具备易清洗、可剥离的可逆属性，耐火性能远超常规化学防火涂料；其二为隐蔽式防火分隔技术，利用建筑天井、夹层、走廊闲置空间内置柔性防火帘，常态下收纳于墙体夹缝之中，火灾触发后自动展开完成空间分隔，零视觉干扰；其三为分布式光纤火情预警技术，将超细柔性光纤预埋于梁柱缝隙、墙体夹层内部，实现 24 小时无感火情监测，替代传统外露式烟感、温感报警器，兼顾预警功能与风貌完整性。

二、地域建筑文化导向下防火设计语言现代化转译

我国疆域辽阔，南北气候条件、人文习俗差异显著，逐步衍生出风格各异的地域性建筑文化，封火山墙、内天井、合院布局、夯土墙体等传统防火形制，本身就是地域文化不可或缺的组成部分。将传统防火空间与构件转化为现代化设计语言，让防火构件兼具火情防控与文化展示双重功能，既能打破现代消防设计同质化的行业僵局，也能实现传统建筑防火文化的活态传承，为特色化建筑设计提供全新创作思路。

（一）传统防火空间形制多维转译

传统防火空间形制的现代化转译可从功能、形态、美学三个维度同步推进，实现形神兼备的传承效果。功能维度层面，萃取天井被动排烟、合院分区隔离、防火巷缓冲隔断的核心运行逻辑，剥离古代营造短板，转化为现代建筑中庭通风、庭院防火缓冲、组团间距隔离等通用设计手法，适配高层住宅、大型公建、乡村民居等多元场景；形态维度层面，复刻传统特色建筑空间布局，南方密集型项目借鉴天井院围合形制，北方开阔型项目沿用多进四合院对称布局，山地聚落参考传统街巷分级规划模式；美学维度层面，提炼马头墙阶梯轮廓、方正天井、夯土墙面肌理等视觉符号，融入现代建筑屋面造型、外立面装饰、室内空间设计之中，让防火空间成为建筑文化表达的核心载体。

（二）传统防火构造升级与适配

针对传统单一防火构件存在的强度不足、抗风化能力弱、施工效率低等缺陷，结合现代建材技术开展材料与工艺双重升级，完成防火构造现代化适配。针对泥裹木构造，升级原有麻刀灰原料，研发复合型无机防火砂浆，适配现代钢木混合

结构、纯木结构建筑的构件防护；针对封火山墙，简化复杂阶梯造型，制作标准化预制混凝土、复合砖石墙板，降低施工难度，适配城市高层住宅、沿街商业建筑的外立面防火分隔；针对传统夯土围护墙体，添加植物纤维、微量无机固化剂，改良而成高强度复合夯土板材，解决传统墙体易开裂、承载力不足的痛点，广泛应用于文旅建筑外立面；针对传统防火巷，结合现代景观设计理念，打造绿化防火一体化隔离带，兼顾美观性与防火功能性。

（三）地域专属化设计范式构建

结合不同应用场景与地域文化特征，整合空间转译手法与升级后的防火构造，构建三类可直接复用的标准化设计范式。民居设计范式以内天井、小型合院为空间核心，以改良夯土、青砖为外围护材料，适配南北方乡村新建低层民居，兼顾低成本防火与乡土风貌；历史街区更新范式以原始街巷肌理为基础骨架，以隐形可逆防火技术、绿化缓冲带为核心防火载体，适配古城、古镇、老旧历史街区的更新改造工作；地域公共建筑设计范式以传统防火美学符号为造型内核，以模块化复合防火板材为围护结构，适配民俗展馆、文化礼堂、文旅服务中心等公共项目。三类范式覆盖当下主流建筑类型，为设计人员提供标准化参考模板。

三、风貌适配型性能化防火设计体系构建

条文式防火设计体系以统一量化规范为约束标准，适配普通民用建筑，但无法兼顾文物建筑、历史风貌建筑的文化属性。为从制度层面彻底化解消防安全与风貌保护的深层矛盾，填补特殊建筑消防设计体系空白，需突破传统设计思维桎梏，搭建风貌适配型性能化防火设计体系。该体系以性能目标为导向、文化红线为约束、全生命周期管控为手段，重新定义特殊建筑消防设计评价标准，推动消防设计由标准化管控向特色化适配转型。

（一）体系核心目标与基本原则

风貌适配型性能化防火设计体系以消防安全、文化传承、空间功能三者协同统一为总体发展目标，在保障人员生命安全、遏制火灾灾害的基础上，最大化保护建筑地域文化特色与原始风貌。在设计原则层面，除常规性能化防火设计的安全可控、经济合理、动态适配原则之外，新增三项专属约束原则。风貌适配原则要求所有防火设计措施、消防设备选型需契合建筑整体风格，禁止违和式硬质改造；文化赋能原则鼓励活用传统防火设计语言，将防火构件转化为文化展示载体；

最小干预原则严格管控改造范围与改造强度，优先选用被动防火技术与隐形设备，严控对建筑本体的拆改力度，从顶层设计层面平衡多重设计需求。

（二）全闭环六阶段实施运行框架

结合建筑项目全生命周期流程，搭建前期调研、目标制定、方案设计、施工图落地、验收校验、运维管控六大阶段的闭环实施框架。前期调研阶段完成建筑文物等级评定、火灾风险等级划分、风貌价值研判，划定改造红线；目标制定阶段结合调研数据，制定差异化防火性能指标与风貌保护底线；方案设计阶段同步开展防火布局设计与风貌适配优化，依托火灾动力学、BIM 仿真技术校验方案可行性；施工图落地阶段细化构件参数与施工工序，明确禁止施工区域；验收校验阶段实行消防安全、风貌保护双向专项验收，两项指标全部达标方可投入使用；运维管控阶段建立常态化巡检机制，定期检测防火构件与设备运行状态，动态更新防火应急预案，形成全流程一体化管控模式。

（三）多维度配套支撑保障体系

为保障风貌适配型性能化防火设计体系能够落地普及，需要从制度、技术、人才、行业四个维度搭建配套支撑体系。制度层面，住建部门与文旅部门协同完善历史建筑、文物建筑性能化防火设计专项规范，增设风貌适配审批条款，优化特殊项目审批流程；技术层面，行业协会牵头编撰《传统防火构造现代化应用指南》，搭建乡土建材防火性能数据库，为设计工作提供数据支撑；人才层面，高校优化建筑学、消防工程专业课程体系，增设古建消防、地域建筑文化相关课程，培养兼具消防知识与文化素养的复合型人才；行业层面，打造多元化标杆示范项目，开展行业评优推广活动，引导设计团队转变固有设计思维，全方位推动文化导向型消防设计模式普及落地。

基于文化延续性的消防设计创新，是新时代建筑消防行业高质量发展的必然趋势，也是地域建筑文化活态传承的重要途径。通过制定分级分类的文物建筑改造策略，依托隐形可逆技术平衡风貌保护与防火安全；完成传统防火空间与构件的现代化设计语言转译，打造适配不同地域、不同场景的专属设计范式；搭建完善的风貌适配型性能化防火设计体系与配套保障机制，能够有效破解特殊建筑防火改造同质化、破坏性改造等行业难题，革新特殊建筑消防设计评价体系，促使我国建筑消防设计摆脱单一标准化束缚，形成标准化与特色化并存、安全性与文化性兼顾的全新发展格局。

第三章 乡村规划设计理论与实践：新建与改造并重

第一节 乡村振兴背景下的消防规划策略

在乡村振兴战略纵深推进的时代背景下，国内乡村人居环境整治、特色村落开发、民居新建改造、乡村配套公建建设工作全面提速，乡村聚落空间形态、人口聚集模式与生产生活业态发生深层次变革。长期以来，我国乡村消防规划依附于村庄整体规划，并未形成独立、系统化的防灾专项体系，多数村落沿用原始自发式防灾模式，难以应对现阶段复杂化的火灾风险。基于上述现状，本节立足于国土空间规划视角，剖析乡村消防安全现存核心痛点，统筹全域消防资源布局，搭建低成本、易运维、适配低密度乡村聚落的分级消防管控体系，为乡村防灾规划提供规范化、可落地的理论依据与设计方案。

一、乡村聚落原生消防安全短板与成因剖析

乡村消防安全问题并非单一要素造成，而是空间规划、基建配套、材料构造、管理体系、居民意识多维度缺陷叠加形成的综合性问题。我国乡村数量庞大、地域特征迥异、经济层级分化明显，偏远山区、平原村落、城郊乡村火灾风险侧重点各不相同，但整体均存在共性原生短板。深入剖析各类短板的外在表现与内在成因，是制定科学化消防规划、补齐乡村防灾短板的前置基础。

（一）聚落布局分散且防火单元混乱

受农耕文明生产模式、地形地貌条件双重制约，国内绝大多数传统乡村聚落呈现自发性、松散化的布局特征，整体缺乏统一的前期规划管控，消防安全隐患根深蒂固。山地丘陵地区乡村受制于崎岖地形，民居沿山体等高线零散排布，组团之间间距过大、联系通道杂乱无序，无法形成规整的防火分区；平原地区村落民居无序扩建，新建农房随意挤占公共空间，老旧民居与新建住宅交错分布，部分农户私搭乱建附属用房、储物棚屋，大量可燃简易构筑物侵占巷道间距，直接

打破原始防火缓冲空间。与此同时，多数乡村并未划分专用明火隔离区域，养殖用房、柴火储存棚、小型家庭作坊等高风险功能空间，随意布置于居住组团内部，与民居主体建筑零距离衔接。此类布局模式在火灾发生后，一方面会导致火情多点爆发、蔓延路径无序化，难以精准锁定火源；另一方面零散化的组团布局会拉长消防救援半径，增加外部消防队伍进场救援难度，极易出现小火蔓延成片、初期火情失控的灾害现象。

（二）消防基础设施配套层级偏低

消防基础设施是火灾初期扑救与应急救援的硬性保障，涵盖消防通行通道、应急取水水源、基础灭火器材、火情预警设备四大类别，而基础设施薄弱是制约我国乡村消防建设最核心的硬性短板。消防通道层面，老旧村落内部巷道多为历史自发形成，普遍存在宽度不足、弯道密集、断头路较多等问题，主巷道宽度普遍小于四米，无法满足大型消防车通行标准，狭窄巷道也会阻碍微型消防车辆、应急人员快速抵达火情点位；新建村落虽主干道达标，但宅间支路缺乏统一规划，普遍存在私家车占道、杂物堆积等问题，变相封锁应急通道。消防水源层面，城市依托市政管网实现全域供水，而乡村供水体系不完善，偏远村落无专用消防供水管网，仅依靠天然河道、池塘、浅层水井作为应急水源，枯水期水源枯竭、取水点位分散；平原村落虽铺设自来水管网，但未配套专用消防栓，水压无法满足灭火需求。除此之外，灭火器材配备不均衡、预警设备覆盖率低、设备后期无人运维等问题普遍存在，进一步加剧乡村火灾风险。

（三）消防管理制度缺位与意识薄弱

完备的基础设施需要配套管理制度赋能，才能发挥长效防灾作用，现阶段我国乡村消防管理存在制度、人员、意识三重缺位。制度层面，村庄规划普遍缺少消防专项章节，基层村委未制定常态化消防管理制度、明火管控条例、火灾应急处置预案，消防规划权责划分模糊，日常管控无据可依；人员层面，乡村无专职消防队伍，仅依靠村干部、村民志愿者组成兼职应急队伍，队伍成员未接受系统化消防培训，缺乏火情识别、初期灭火、人员疏散的专业能力，且人员流动性大，难以形成稳定的基层救援力量；意识层面，乡村居民整体消防安全认知偏低，生产生活中存在大量习惯性危险行为，日常随意堆放秸秆柴火、室内违规使用大功率电器、老旧线路私拉乱接、祭祀明火无防护措施。同时多数村民存在侥幸心理，忽视小型火灾隐患，且不了解基础灭火器材使用方法，错失火灾初期最佳扑救时

机，人为放大火灾灾害破坏力。

二、基于国土空间规划的全域消防资源统筹布局

国土空间规划是乡村建设发展的顶层纲领，能够统筹村庄土地利用、空间布局、基础设施配套等各项建设内容。将消防专项规划深度融入乡村国土空间总体规划、详细规划之中，打破消防规划独立化、碎片化的布局模式，依托三级规划体系统筹消防通道、微型消防站、应急水源、避险场地全域布局，实现消防资源均衡化、全覆盖配置，从规划源头补齐乡村消防安全短板，构建全域一体化防灾格局。

（一）分级分类优化全域消防通行通道

结合乡村聚落空间层级，搭建主干道、组团支路、入户小道三级一体化消防通道网络，适配不同规模村落、不同地形区域的救援通行需求。一级主干道作为村庄对外应急通道，宽度统一规划至四至六米，连通乡镇主干道与村落各个组团，保障大型消防车、应急物资运输车辆正常通行，同时禁止私家车、农作物、建筑垃圾占道停放与堆放，划定消防通道红线，由村委专人常态化巡查管控；二级组团支路承担组团内部疏散与小型救援任务，宽度控制在二至四米，打通断头巷道、拓宽狭窄瓶颈路段，联动主干道划分独立防火组团；三级入户小道以人员疏散为主，衔接民居出入口与组团支路，保障火灾工况下居民快速撤离。针对山地零散型村落，因地制宜优化环山应急通道，结合地形增设错车平台，规避硬性拓宽道路破坏山体生态；针对老旧历史村落，采用微更新模式疏通巷道，在不破坏原始街巷肌理的前提下，清理违建构筑物，盘活闲置空间作为临时疏散缓冲区。

（二）均衡化布设多层级微型消防站点

考虑到乡村聚落低密度、广覆盖的布局特征，照搬城市大型消防站模式存在造价过高、运维成本大、资源浪费等问题，微型消防站凭借占地小、造价低、响应速度快、适配性强的优势，成为乡村消防站点建设的最优选择。结合村庄常住人口规模、聚落组团间距、地形条件，实行分级布点模式。中心集聚型行政村，在村庄几何中心位置设置一级微型消防站，配备基础灭火器材、简易破拆设备、应急照明工具与专职兼职救援人员，覆盖全村全域范围；零散组团型村落，以五百米救援半径为基准，在偏远分散组团增设二级简易消防点位，配置灭火器、消防水带、储水桶等轻量化设备，实现火情快速响应；自然村组层面，依托党群

服务中心、村级文化礼堂等公共建筑，设置共享消防器材柜，将公共建筑转化为临时应急救援站点。同时建立乡镇消防站统筹、村级消防站联动的调度机制，缩短火灾救援响应时间，构建“乡镇主站—村级微站—组团点位”三级联动救援体系。

（三）多源互补完善全域消防供水体系

遵循“因地制宜、多源互补、低成本运维”的规划原则，整合人工管网水源与天然生态水源，搭建双轨并行的乡村消防供水体系。市政供水区域内的城郊村落、平原中心村，依托现有自来水管网增设地上式消防栓，消防栓间距控制在二百二十米以内，重点覆盖民居密集组团、公共建筑区域，同步改造老旧供水管网，提升管网供水压力，满足持续灭火取水需求；无市政供水的偏远山地村落，盘活池塘、河道、山泉、蓄水池等天然水资源，在临水区域设置标准化应急取水平台，配备固定取水接口与防护围栏；干旱缺水区域推广分布式储水模式，在公共庭院、街巷空地布设大型防渗储水缸、模块化蓄水池，日常蓄积雨水与生活用水，专项用于初期火灾扑救。此外，将景观水池、灌溉水库纳入消防水源储备体系，实现灌溉、景观、防灾一体化复用，大幅降低消防水源建设成本。

三、适配低密聚落的分级消防规划管控体系

结合乡村低密度、碎片化、低成本运维的核心特征，从空间分区、风险管控、运维管理、应急避险四个维度，搭建适配乡村发展现状的分级消防规划管控体系。该体系摒弃城市高强度、高成本的管控模式，贴合乡村经济水平、人居习惯与管理能力，兼顾防火防控、初期灭火、应急疏散、后期运维全流程，形成规划有依据、建设有标准、管理有主体、应急有预案的闭环管控格局。

（一）精细化划分多层次防火管控单元

以聚落组团、街巷通道、自然水系、绿化隔离带为边界，自上而下划分村庄、组团、院落三级防火管控单元，落实网格化管控责任。村级层面以整个行政村为整体管控单元，明确整体消防防控目标、基础设施配套标准与全域应急避险场地；组团层面以密集民居片区为基础防火单元，单元内部严控明火高危用房布局，统一规范柴火、秸秆储存位置，拆除违规搭建的可燃附属构筑物；院落层面以单户及联户院落为最小管控单元，制定农户防火行为准则，规范室内线路铺设、明火使用、易燃易爆物品存放方式。针对不同等级的管控单元，制定差异化管控标准，密集居住单元收紧明火管控、加密消防设施；零散偏远单元强化居民自主防控，

增设简易储水设备，实现分级施策、精准管控，从空间层面降低连片火灾风险。

（二）差异化落实低成本常态化运维机制

高成本运维体系无法适配乡村基层发展现状，低成本、轻量化、易操作的运维机制是消防规划长效落地的关键。资金层面，构建政府专项补贴、村集体自筹、村民自愿分摊三位一体的资金筹措模式，政府侧重基础设施新建与大型设备采购，村集体与村民承担日常小型器材更新、水源维护成本，减轻单方资金压力；人员层面，组建由村干部牵头、党员骨干、青壮年村民组成的兼职消防队伍，定期邀请乡镇消防专员开展免费培训，普及灭火、疏散、自救基础知识，建立常态化值班巡查制度；设备层面，简化消防设备种类，优先选用易操作、低成本、低损耗的基础器材，禁止配置复杂专业设备，同时建立设备台账，每季度开展设备巡检，及时更换过期灭火器、破损水带。此外，结合乡村民俗节日、农耕节点，针对性开展明火专项管控，规避祭祀、秋收期间火灾高发风险。

（三）平灾结合搭建全域应急避险体系

应急避险体系是火灾灾害发生后保障居民生命安全的最后一道防线，规划设计过程中遵循平灾共用、就近避险、分级集散的原则，整合乡村公共空间资源，完善疏散避险网络。避险场地分级规划，一级避险场地依托村庄广场、文化活动现场打造，可容纳全村受灾居民，配套应急物资储备室、临时医疗点位；二级避险场地以组团庭院、闲置空地为主，服务周边数十户居民，用于火灾初期临时集散；三级疏散通道衔接民居、避险场地、对外主干道，与消防通道双向复用。日常状态下，避险场地承担居民休闲、民俗活动、文体活动功能；火灾及其他灾害工况下，快速转换为应急集散、物资调配、伤员安置场地。同时编制通俗易懂的村级火灾应急处置预案，简化应急流程，定期组织村民开展低成本简易消防演练，提升基层整体防灾抗压能力。

乡村消防规划建设是乡村人居环境整治与防灾减灾工程的重要组成部分，直面聚落布局零散、基础设施薄弱、管理制度缺失三大原生短板，依托国土空间规划完成消防通道、微型站点、应急水源全域统筹布局，通过分级防火单元、低成本运维机制、平灾应急避险体系搭建完整的乡村消防管控模式。整套规划体系贴合乡村低密度的空间特征与低成本运维需求，适配不同地域、不同经济层级的乡村建设现状，能够有效破解乡村火灾防控难题，补齐基层防灾短板，完善我国城乡一体化消防防灾网络，助力乡村振兴战略下人居环境高质量发展。

第二节 乡村公共建筑的新建：功能、防火与地域性融合

乡村公共建筑是承载村民公共活动、政务服务、文化交流、民俗集会的核心空间，主要涵盖党群服务中心、村级文化礼堂、村民大礼堂、村级卫生室、民俗活动驿站等建筑类型，是乡村人居环境体系中不可或缺的关键模块。相较于普通乡村民居，乡村公建具备人员聚集度高、功能复合性强、使用时段集中、受众覆盖面广等特征，火灾风险等级更高、灾害影响范围更广。基于此，本节结合乡村公建设计痛点，优化防火分区、疏散系统、耐火构件核心设计内容，融合本土耐火建材与传统营造形制，实现消防安全、使用功能、地域风貌三者协同统一。

一、乡村公共建筑基本特征与消防设计痛点

乡村公共建筑服务于基层村民，区别于城市大型公共建筑，具备规模小型化、功能复合型、使用潮汐化、风格乡土化四大专属特征，无法直接套用城市公建消防设计规范与方案。当下多数设计人员忽视乡村公建专属属性，机械式套用标准化设计模板，导致防火设计与实际使用场景脱节，衍生出诸多消防安全隐患与风貌同质化问题，深入梳理设计难点，是优化乡村公建防火体系的基础前提。

（一）功能复合引发防火分区界定难题

受建设资金、建设用地双重限制，乡村公共建筑普遍采用一体化复合布局模式，独栋建筑内部集成政务办公、会议宣讲、文体娱乐、民俗聚餐、仓储储物等多项功能，空间边界模糊、功能相互交织，与城市公建单一楼层单一功能的布局模式存在本质区别。以应用最广泛的村级礼堂为例，建筑主空间为大型集会大厅，兼顾宴席举办、文艺演出、村民会议等功能，附属空间配套小型办公室、器材储藏室、厨房后厨等辅助功能区域。后厨明火作业、储藏室可燃杂物堆积、集会大厅人员密集，三类高风险区域无缝衔接，没有明确的物理分隔边界。按照城市防火分区标准增设防火墙、防火门窗，会割裂建筑空间完整性，破坏集会、聚餐等核心使用功能；若简化防火分隔设计，则会导致防火分区面积超标，火情极易从高危附属空间蔓延至人员密集主空间，形成严重安全隐患，如何平衡复合功能与防火分区划分，成为乡村公建设计首要难点。

（二）潮汐人流加剧应急疏散设计压力

乡村公建人员流动具备极强的潮汐化特征，日常时段人流量稀少，仅少量工

作人员办公值守；节假日、民俗节庆、红白宴席时段，短时间内聚集上百名村民，人员密度瞬间达到峰值，且聚集人群以老人、儿童等自救能力偏弱的群体为主，大幅提升疏散设计难度。从空间层面分析，集会大厅普遍采用大跨度无柱空间设计，内部无多余隔断，虽能满足集会需求，但火灾工况下高温烟气扩散速度更快；从人群层面分析，乡村中老年村民消防安全认知匮乏，不熟悉疏散通道位置、缺乏应急逃生经验，慌乱状态下极易出现拥挤、踩踏等次生灾害。与此同时，部分新建乡村公建为节约造价、简化施工，刻意压缩疏散出入口数量、缩小疏散通道宽度，仅设置单一主出入口，潮汐化人流叠加单一疏散通道，极易在火灾突发时形成拥堵死局，直接威胁人员生命安全。

（三）标准化设计消解乡土地域建筑风貌

当前乡村公建新建项目普遍存在风貌同质化严重的行业通病，多数地方政府与设计单位为降低设计成本、加快施工进度，统一采用模块化、标准化的现代板式建筑形制，外立面以涂料、瓷砖、玻璃幕墙为主，内部构件全部采用工业化预制建材。此类现代化建筑形制虽然施工便捷、造价可控，但完全脱离本土地域建筑文化，与周边传统民居、乡村自然环境格格不入。同时部分项目为满足消防规范硬性要求，加装外露式防火墙、标准化防火卷帘、统一规格防火门窗，硬质防火构件进一步破坏建筑外立面完整性。标准化设计模式下的乡村公建，丧失南北地域差异性，传统坡屋顶、夯土墙面、内天井等乡土建筑符号逐渐消失，使得乡村公共空间文化辨识度持续降低，不利于乡土建筑文化长效传承。

二、面向人员安全的公共建筑防火体系优化设计

以人员快速疏散、火情精准管控、初期火灾遏制为核心目标，结合乡村公建复合化功能、潮汐化人流、小型化体量的专属特征，从防火分区优化、疏散系统重构、耐火构件升级三个维度，针对性优化消防设计方案，摒弃城市机械式规范套用模式，制定适配乡村公建使用场景的防火设计策略，在不影响建筑使用功能的前提下，全方位提升建筑火灾抵御能力。

（一）柔性化防火分区分隔策略

针对复合功能空间防火分区难以界定的痛点，采用硬性分隔与柔性缓冲相结合的模式，替代单一防火墙分隔方案。对于后厨、储藏室、设备机房等明火高危附属空间，采用实心砖墙、甲级防火门窗进行封闭式硬性分隔，独立划定专属防

火单元，从源头隔绝火源；对于集会大厅、活动展厅等人员密集主空间，摒弃大面积增设防火墙的做法，利用固定家具、景观隔断、竖向通风天井划分柔性防火亚分区，既保障空间完整性，又能延缓火势与烟气全域扩散；对于多层结构乡村公建，在楼层之间设置封闭式防火楼梯间，每层按照功能属性划分独立防火分区，严控竖向火势蔓延路径。除此之外，结合《建筑设计防火规范》针对低层小型公建的豁免条款，适当放宽集会大厅防火分区面积上限，配套完善排烟系统与灭火器材，实现防火安全与空间功能双向平衡。

（二）多向通达式疏散通道系统设计

基于潮汐化人流特征，搭建多出口、环形化、分级式的应急疏散系统，彻底解决单一通道拥堵隐患。建筑整体层面，严格禁止仅设置单一出入口的设计模式，人员密集型公建至少配置两处及以上朝向不同方向的独立疏散出入口，出入口直接连通外部集散空地与村级消防通道；室内空间层面，大跨度集会大厅采用环形疏散走道，环绕主空间布置疏散出口，缩短最远疏散距离，保障室内任意点位至出口距离控制在规范阈值之内；楼层设计层面，多层公建设置两部独立封闭疏散楼梯，楼梯间直通室外地面，禁止楼梯间兼做储物空间。同时优化疏散通道配套设计，通道内部严禁堆放杂物、设置隔断，墙面、地面采用 A 级不燃材料装修，疏散指示标识选用大字号简易图标，适配老年群体识别习惯，全方位提升疏散系统实用性与安全性。

（三）适配低层公建的耐火构件升级

结合乡村公建低层、小型化的结构特征，分级优化承重构件、围护构件、装饰构件耐火等级，构建多层级构件防护体系。主体承重构件层面，框架柱、框架梁优先采用钢筋混凝土结构，若采用钢木混合结构，则对木质、钢质构件表层涂刷无机防火砂浆，复刻传统泥裹木防火构造，提升构件耐火极限；外围护构件层面，外墙、分户隔墙采用改良夯土板材、青砖砌体等 A 级不燃乡土建材，替代可燃轻质隔墙，兼顾围护功能与防火性能；屋面与装饰构件层面，屋面统一采用青瓦、水泥瓦等不燃屋面材料，禁止使用彩钢板、可燃保温板材，室内吊顶、墙面装饰材料全部选用低烟无毒无机装饰材料，严控可燃装饰材料使用率。构件升级过程中，以低成本改造为基本原则，优先依托乡土建材完成阻燃升级，控制整体工程造价。

三、防火构造、使用功能与地域风貌的融合设计

乡村公共建筑不仅承担政务服务与公共活动功能，更是乡土文化展示的重要载体，优质的乡村公建设计需要兼顾消防安全、日常使用、地域风貌三重价值。依托本土耐火乡土建材，转译传统民居坡屋顶、内天井、合院布局等经典营造形制，将防火构造隐形融入建筑造型与空间布局之中，弱化专用防火构件的突兀感，打造功能完备、安全可靠、风貌纯正的本土化乡村公共建筑，破解消防设计与乡土风貌相互矛盾的行业难题。

（一）本土耐火建材的适配性选用

夯土、青砖、天然石材、改良复合灰浆等乡土建材，本身具备 A 级不燃、低碳环保、造价低廉、肌理独特的优势，完美适配低层乡村公建围护、装饰、防火构件设计。在选材应用层面，外围护墙体优先选用三合土夯土墙与青砖砌体，利用材料天然防火属性，替代高成本工业化防火板材；屋面檐口、门窗边框、墙角边角等易起火部位，采用天然石材进行包覆防护，阻断明火引燃木质构件；室内构件防护层面，采用传统无机麻刀灰包覆局部木质装饰构件，低成本实现阻燃防护。同时结合南北地域差异化选材，北方干燥地区侧重推广复合夯土墙体，兼顾保温与防火功能；南方湿润地区优先选用青砖与石材组合构造，提升墙体抗风化、防潮防火能力，在降低建设成本的同时，还原乡村建筑原始肌理。

（二）传统营造形制的现代化转译应用

提取适配公建场景的传统乡土建筑形制，从空间布局、外立面造型、细部符号三个维度完成现代化转译，让传统形制同时承载防火功能与文化价值。空间布局上，中小型村级礼堂、文化中心采用小型多进合院与内天井布局模式，天井承担被动排烟、自然通风、应急采光功能，庭院作为室内外缓冲空间，辅助划分防火单元；外立面造型上，简化传统民居复杂的马头墙、坡屋顶形制，提取阶梯屋檐、平缓坡顶等核心视觉符号，融入现代公建设计之中，替代平直单调的板式外立面；细部设计上，门窗形制、檐下装饰参照地域传统民居样式，摒弃城市化玻璃落地窗设计，搭配本土化木质门窗与石材边框。转译后的建筑形制，既符合现代消防规范，又能够彰显独有的乡土文化特质。

（三）多功能一体化融合设计落地路径

为实现防火、功能、风貌三者深度融合，建立从前期策划、方案设计到施工

落地的一体化设计路径。前期策划阶段，结合村庄定位、民俗文化、场地条件，明确建筑功能配比、防火等级、风貌基调，划定设计红线；方案设计阶段，将被动防火空间、乡土防火构造作为设计出发点，以合院天井划分防火单元，以夯土青砖作为围护主体，以传统符号塑造外立面风貌，让防火构造成为建筑造型的组成部分，而非后期附加构件；施工落地阶段，优先聘用本地乡村工匠，沿用成熟乡土营造工艺搭配现代施工技术，兼顾施工效率与乡土质感。同时严控专用防火构件外露占比，所有防火卷帘、防火隔断、消防设备全部内置隐蔽设置，实现消防功能隐形化、建筑风貌本土化、使用体验最优化。

乡村公共建筑新建工作需要跳出城市标准化设计思维桎梏，结合潮汐人流、复合功能、乡土属性三大专属特征，精准破解防火分区界定困难、疏散系统设计受限、建筑风貌同质化的核心痛点。通过柔性分隔模式优化防火分区、搭建多向通达的分级疏散系统、升级各类建筑构件耐火性能，夯实建筑消防安全基础；依托本土耐火建材与传统营造形制，完成设计语言现代化转译，将防火构造隐形融入建筑整体设计之中，最终打造安全适配、功能完善、风貌纯正的本土化乡村公共建筑，全方位提升乡村公共空间品质，夯实乡村振兴背景下人居环境建设基础。

第三节 乡村住宅建筑的新建：防火单元、疏散与材料选择

在乡村振兴人居环境提质工程持续推进的背景下，国内各地迎来自建房新建热潮，多层自住型农家住宅逐步取代传统单层民居，成为现阶段乡村住宅建设的主流形态。区别于低层简易农房，多层自住住宅空间功能复合、竖向层数增加、木质构件占比偏高，加之农户自主建设缺乏专业消防设计指导，普遍存在功能分区混乱、逃生路径不合理、建材选用随意等问题，火灾隐患远高于传统单层民居。作为村民日常居住的核心场所，乡村住宅消防安全直接关系基层居民生命财产安全。基于多层农家自住住宅建设现状，从室内防火单元划分、简易疏散体系优化、本土化耐火建材应用三个维度展开探究，建立适配乡村自建住宅的标准化防火设计体系，兼顾建设成本、居住舒适度与消防安全，为乡村自建住宅规范化建设提供理论支撑与实操依据。

（二）住宅防火现存普遍性问题

现阶段我国农户自建多层住宅多由民间施工队伍承接建设，施工人员以传统

乡土工匠为主，大多缺乏系统化消防设计知识，建设过程仅依据过往施工经验与业主主观需求，消防设计长期处于缺位状态。在空间布局层面，多数农户未单独划分高危功能区域，厨房、杂物储物间、电气设备间随意布置于首层乃至上层休憩区域，高危区域与卧室、客厅等人员常驻区域无任何防火隔断；在疏散设计层面，盲目追求室内空间通透感，取消封闭楼梯间，室内楼梯直接连通所有楼层，且未配置专用应急逃生窗口；在建材选用层面，片面追求装修美观与低廉造价，大量使用可燃泡沫保温材料、木质装饰板材，同时忽视承重木构件阻燃处理，从材料层面放大火灾风险，形成普遍性消防安全漏洞。

（三）低成本适配型整体设计原则

结合乡村多层住宅建设痛点与农户经济条件，确立三项核心防火设计原则。其一为低成本易落地原则，摒弃高成本智能化消防设备，以被动防火设计为核心，依托空间分隔、材料升级、简易逃生设施完成防火升级，严控建设增量成本，适配普通农户收支水平；其二为功能适配原则，防火设计不得破坏民居日常居住属性，尊重农户柴火储存、餐厨一体、多层分户居住等乡土生活习惯，拒绝机械化规范套用；其三为层级设防原则，以高危空间隔离为第一道防线，以多路径疏散为第二道防线，以耐火建材防护为第三道防线，搭建多层次被动防火体系，全方位降低火灾发生概率与灾害损失程度。

二、功能分区导向下室内防火单元划分策略

室内功能混杂、高危空间无隔离是多层自建住宅火灾失控的核心诱因，划分独立防火单元是从源头遏制火势扩散的核心手段。结合农家住宅起居、烹饪、储物、休憩四大基础功能，按照风险等级对室内空间进行等级划分，通过硬性隔墙、防火门窗、缓冲空间等设施，分隔高危防火单元与常驻居住单元，明确单元边界，阻断火势横向与竖向蔓延路径，构建分区管控、风险隔离的室内防火格局。

（一）高危储物烹饪单元独立封闭

厨房与杂物储物间是乡村住宅火灾最高发区域，统一划分为高危防火单元，实行全封闭式独立管控。厨房单元规划阶段，优先固定布置于建筑首层下风口角落位置，远离主入口与卧室区域，采用 120mm 厚度以上实心烧结砖墙作为围护墙体，门窗统一配置乙级防火门窗，实现烹饪空间与起居空间物理隔离；针对开放式厨房设计偏好，可设置可拆卸式防火隔断卷帘，日常开启保障空间通透，用

火时段关闭完成防火分隔。杂物储物单元主要用于堆放秸秆、柴火、闲置家具、农用物资等可燃物品，严禁布置于二层及以上休憩楼层，首层专属储物间需单独设置密闭房门，内部禁止布设大功率电气线路，同时与厨房保持六米以上安全间距；条件受限的自建住宅，可利用室外附属小院搭建封闭式储物棚，将易燃物资移出室内，从源头降低室内起火概率。

（二）常驻居住单元一体化防护

卧室、客厅、书房等人员长期停留的空间，划定为核心居住防火单元，以提升人员避险能力、延缓火情入侵为设计目标。居住单元内部禁止私自增设夹层、隔断等可燃构筑物，室内分户隔墙全部采用 A 级不燃建材，严控横向火势蔓延；针对多层住宅二层、三层卧室集群，将同楼层所有休憩空间整合为完整居住单元，单元出入口设置简易防火门，隔绝外部烟气与明火。同时规范居住单元内部电气线路铺设标准，所有线路必须穿阻燃金属套管埋设，禁止线路裸漏布设、私拉乱接插排，床头、沙发等人员常驻点位周边，禁止堆放衣物、纸箱等轻质易燃杂物。对于分户出租、多户同住的多层住宅，以独立套房为最小居住单元，增设分户防火隔墙，避免单一套房起火波及整栋建筑。

（三）竖向交通单元专项防火封堵

室内楼梯、采光天井、管线井道等竖向交通空间，是火势竖向扩散的主要通道，需单独划分为交通防火单元并做专项封堵处理。室内楼梯优先设置封闭式楼梯间，楼梯间墙体采用实心砖墙，首层楼梯出入口配置防火门，楼梯内部禁止堆放农用杂物、生活废品；无条件增设封闭楼梯间的既有新建住宅，需在楼梯上下端口增设防火隔断，降低烟囱效应带来的火灾负面影响。电气管线、给排水管道穿越楼层与墙体的缝隙处，采用防火密封胶、无机防火封堵材料进行密实填充，阻断烟气渗漏通道；内置式采光天井四周增设防火矮墙，限定天井竖向火势蔓延范围，同时联动天井空间优化自然排烟功能，实现防护与排烟双向兼顾，完善室内全方位防火单元体系。

三、适配乡村住宅的疏散体系与建材管控方案

在完善防火单元的基础上，结合多层住宅竖向逃生难度大、使用者自救能力薄弱的特征，简化疏散设计逻辑，配置低成本简易逃生设施；同时规范建筑用材标准，推广本土化阻燃乡土建材，细化木质构件阻燃施工流程，从疏散避险、建

材防护双重维度，补齐乡村自建住宅消防安全短板，形成隔离 + 疏散 + 材料防护的一体化防火模式。

（一）极简立体化疏散路径规划

摒弃城市住宅复杂的多环线疏散设计模式，以就近逃生、操作简单、造价低廉为核心原则，搭建室内主通道 + 室外备用通道的立体化双疏散体系。室内疏散层面，优化楼梯布局，保证每栋多层住宅至少拥有一部直通首层室外的专用疏散楼梯，楼梯净宽度不小于 1.1 米，取消楼梯内部踏步装饰、可燃护栏，采用石材、金属等不燃材质制作护栏；规整室内疏散走道，清除走道内杂物、临时隔断，保障居住单元至楼梯口无遮挡直行通行。室外备用疏散层面，二层及以上卧室、客厅必须设置专用逃生窗口，窗口净尺寸不小于 $0.9\text{m} \times 1.2\text{m}$ ，窗口下方无硬质障碍物；针对高楼层户型，配套增设可拆卸外挂式金属疏散楼梯，常态下收纳于墙体侧边，火灾工况下快速组装使用，为主被困人员提供备用逃生渠道。

（二）简易逃生设施标准化配置

结合乡村居民认知水平与操作能力，统一规范各类简易逃生设施的配置标准与布设位置。逃生窗口作为基础应急设施，禁止采用防盗死锁护栏，需配套可一键开启的防盗防护窗，兼顾日常安防与火灾逃生需求；外窗间距较大的户型，可配备便携式逃生绳、防滑缓降器，放置于卧室易取用位置，并由施工方同步告知农户使用方法。应急辅助设施层面，每户首层、二层楼层分别配置 2 具干粉灭火器、1 组应急照明设备，走廊、楼梯间张贴大号筒体疏散指示标识；针对老年住户专属房间，额外增设独立烟雾报警器，提前预警火情，弥补老年群体火情感知能力弱的短板。所有逃生设施采购成本低廉、操作流程简单，无需专业技能即可使用，适配乡村住宅常态化应用场景。

（三）乡土阻燃材料选用与构件施工规范

优化乡村住宅建材选用体系，优先推广夯土、烧结砖、天然石材等本土天然阻燃建材，严控可燃保温、装饰材料使用率，同时制定标准化木质构件阻燃施工规程。围护结构选材上，外墙、分户隔墙、防火墙优先采用改良复合夯土墙与烧结青砖砌体，此类材料取材便捷、造价低廉、耐火性能优异，同时适配乡土建筑风貌；屋面结构选用青瓦、水泥瓦等不燃屋面材料，保温层替换无机岩棉、玻璃棉等 A 级阻燃保温材料，全面禁止聚苯泡沫板等高危可燃保温层。针对民居必备的木质梁柱、门窗构件，统一阻燃施工标准：施工前期对原木构件进行脱脂除

潮处理,清除内部易腐易燃杂质;施工中期采用无机防火砂浆双面涂刷包覆,包覆厚度不低于 3mm;施工后期喷涂透明水性阻燃保护剂,在不改变木材原始肌理的前提下,提升构件耐火极限,从根本上提升木结构住宅防火性能。

乡村多层自住住宅新建防火设计,需充分贴合农户居住习惯与乡村建设条件,摆脱城市住宅消防设计框架束缚。通过细化高危烹饪储物单元、常驻居住单元、竖向交通单元的划分标准,从空间层面阻断室内火势全域扩散;搭建室内外双轨极简疏散路径,配套标准化简易逃生设施,降低竖向火灾逃生难度;普及本土化阻燃乡土建材,规范木质构件全套阻燃施工流程,夯实建筑本体防火基础。整套设计方案兼顾经济性、实用性与适配性,契合乡村自建住宅低成本建设特征,能够有效化解多层农房自建过程中的各类火灾隐患,完善乡村居住建筑消防设计规范,为乡村人居环境安全建设提供坚实保障。

第四节 乡村既有建筑改造：消防性能提升与传统风貌协调

我国存量乡村建筑涵盖老旧传统民居、历史风貌农房、老旧村级公共建筑两大类,是承载乡土人居文化、记录地域营造技艺的重要物质载体。长期以来,存量建筑受建造年代、经济条件、技术水平限制,普遍存在木构占比过高、消防通道闭塞、应急水源缺失等先天性消防缺陷,且建筑老化加剧火灾风险。相较于新建建筑,既有建筑改造存在双重约束,既要完成消防性能升级,消除存量火灾隐患,又要最大限度保护建筑原始外立面、院落格局与乡土风貌。基于此,结合乡村存量建筑隐患特征,推行隐形化、轻型化改造技术,制定分级分类改造方案,平衡消防安全升级与乡土风貌保护的内在关系,实现防灾安全与文化留存双向统一。

一、乡村存量既有建筑消防隐患识别与改造矛盾

乡村既有建筑建造年限跨度较大,20 世纪老旧砖木结构民居、近现代砖混风貌农房、老旧村级公建并存,不同年代建筑隐患侧重点存在差异化。在开展改造工作前,系统识别各类存量建筑核心消防短板,剖析消防升级与风貌保护之间的矛盾根源,明确改造工作的底线与重难点,为后续改造策略制定、技术选型提供数据支撑与方向指引。

（一）老旧砖木结构民居核心隐患

传统砖木民居是我国乡村存量建筑的主体，多见于古村落、传统聚落内部，此类建筑普遍以木质梁柱作为承重框架，夯土、青砖作为外围护墙体，整体可燃构件占比超过 60%，火灾抵御能力极差。从构件层面分析，老旧木质构件常年受潮湿、虫蛀、风化影响，构件老化腐朽，耐火极限大幅下降，明火接触后极易快速引燃；同时老旧民居室内装饰、储物设施均以木质、秸秆类可燃材料为主，室内可燃物荷载远超现代建筑标准。从空间层面分析，老旧民居沿用自发式合院布局，宅间巷道狭窄弯曲，多数通道宽度不足 2 米，消防车无法通行，仅能依靠人工应急救援；院落内部附属违建棚屋杂乱分布，侵占防火缓冲空间。从配套层面分析，传统村落大多无市政消防管网，天然水源距离民居组团较远，取水难度大，火情爆发后无法及时开展初期灭火作业，小范围火情极易快速蔓延至整片民居集群。

（二）老旧砖混风貌建筑现存问题

20 世纪 90 年代至 2010 年前后建造的砖混结构农房，是现阶段普通乡村最常见的存量建筑，此类建筑主体结构耐火性能优于砖木民居，但消防配套与空间规划层面仍存在诸多短板。此类建筑主体采用砖混结构，承重构件防火性能达标，但屋面、吊顶、门窗装饰大量使用可燃泡沫、木质板材，附属构件火灾隐患突出；建设时期尚未普及乡村消防专项规划，建筑排布密集、楼栋间距不足，未预留专用防火间距，连片排布模式易引发集群式火灾。同时老旧砖混住宅电气线路铺设不规范，线路老化、裸露问题普遍，缺少漏电保护、过载保护装置，电气火灾事故频发。部分砖混建筑为适配农户生活需求，后期私自加建木质阁楼、室外储物棚，违建部分无任何防火防护措施，成为建筑内部新增火灾危险源，进一步加剧整体火灾防控压力。

（三）消防改造与风貌保护深层矛盾

乡村既有风貌建筑改造的核心难点，在于消防安全升级与乡土风貌留存之间的固有矛盾。对于历史价值较高的传统民居，其坡屋顶、马头墙、夯土外立面、内向式合院院落是乡土文化的核心载体，大规模拆改、增设硬质防火墙、外露消防管线，会直接破坏建筑原始肌理，造成不可逆的文化损耗；若一味固守风貌、禁止任何改造，老旧木构老化、消防配套缺失等隐患无法消除，建筑长期处于高火灾风险状态。对于普通存量农房，低成本改造方案多采用标准化外露消防构件，虽然改造成本低、施工难度小，但同质化构件与乡村原生态风貌格格不入；而精

细化隐形改造技术造价偏高，超出基层改造预算，如何平衡改造成本、消防安全、风貌保护三者关系，成为乡村既有建筑更新改造亟需破解的行业难题。

二、低干扰隐形化消防改造关键技术

为化解消防改造与风貌保护之间的矛盾，规避一刀切式硬质改造带来的风貌破坏问题，依托现代化轻型防火构造、隐蔽式管线布设技术，打造低干预、可逆化、隐形化的改造技术体系。该类技术无需大规模拆改建筑主体结构与外立面，适配各类等级乡村存量建筑，可在完整保留院落格局、建筑风貌的前提下，全方位提升建筑被动防火能力与主动消防配套水平。

（一）轻型模块化防火隔离构造

轻型模块化防火隔离构造是替代传统厚重防火墙的核心改造技术，具备自重轻、易安装、可逆性强、无外观违和感等优势，适配老旧民居室内防火单元分隔改造。该类构造以无机防火岩棉、复合阻燃石膏板为芯材，搭配超薄镀锌轻钢龙骨制作而成，整体厚度仅为传统砖墙的二分之一，无需深挖地基、拆除原有墙体，可直接加装于室内功能分区边界，用于分隔厨房、储物间等高风险空间与居住空间。针对传统砖木民居木质框架，可采用包覆式轻型防火板材，对裸露梁柱、椽子等承重木构件进行整体包覆，板材表层复刻夯土、木材肌理，完美适配室内装饰风格。相较于传统改造模式，轻型隔离构造施工周期短、造价低廉，且后期可无损拆卸更换，不会对建筑主体结构与风貌造成永久性破坏，兼顾防护性能与风貌保护双重需求。

（二）隐蔽式消防管线布设工艺

外露式消防水管、报警线路、喷淋管道是破坏建筑外立面风貌的主要因素，隐蔽式管线布设工艺可从根源解决该问题，实现消防配套无感升级。外立面管线改造层面，所有室外消防给水管道、信号传输线路，统一沿建筑墙角、屋檐阴影区、背阴墙面布设，依托外墙装饰线条、青砖压条完成管线隐藏包裹；历史风貌建筑禁止横穿正立面墙体，优先沿侧墙、后墙集中排布，最大限度降低视觉干扰。室内管线层面，利用吊顶夹层、墙体夹缝、地面垫层埋设管线，喷淋头、烟感报警器选用微型隐形款式，嵌入吊顶与墙体内部，常态下隐藏于装饰结构之中。同时优化管线配色方案，外立面管线颜色与墙体青砖、夯土底色保持一致，室内管线贴合装修色调，实现消防管线与建筑本体一体化融合。

（三）无感应急疏散与取水配套改造

疏散设施与消防水源配套改造过程中，秉持平灾共用、无感适配的设计理念，弱化专用消防设施的突兀感。疏散通道改造方面，针对狭窄老旧巷道，不强行拓宽路面，而是清理巷道内部违建杂物、固化泥泞路面，划定固定疏散红线；利用闲置边角空地打造微型集散缓冲庭院，作为火灾临时避险场地，兼顾日常休闲与应急避险功能。逃生设施改造层面，替换老旧建筑固定式防盗死锁窗，升级为同形制可开启仿古防盗逃生窗，外观与原有窗户保持一致，不破坏外立面统一性。消防水源配套层面，整合村落天然池塘、古井、景观水系，设置隐蔽式下沉取水平台，平台表层采用仿古石材铺装，与周边乡土环境相融；室内供水依托原有给排水管道，增设隐形分支接口，实现消防取水与生活用水一体化复用，无需额外增设突兀供水设施。

三、差异化分级改造方案与配套实施保障

结合乡村既有建筑文物等级、历史风貌价值、结构类型，对存量建筑进行等级划分，制定分级分类的改造方案，明确不同等级建筑的改造红线、技术选型、改造标准，同时完善配套保障机制，细化改造资金、审批流程、技术规范，推动隐形化消防改造技术落地普及，实现消防安全、风貌留存、经济适配三者协同统一。

（一）存量建筑等级划分标准

结合文物保护相关条例、建筑建造年代、风貌价值及结构属性，将乡村既有存量建筑划分为保护型、风貌型、普通型三个等级，不同等级建筑划定差异化改造权限与改造底线，具体划分标准及改造约束如下表所示。

建筑等级	涵盖对象	风貌改造红线	消防改造优先级	适配改造技术
保护型建筑	省市级文保民居、传统古建、百年以上砖木老宅	禁止改动外立面、院落格局、原始构件，所有改造措施必须具备可逆性	火情预警 > 构件阻燃 > 水源配套 > 空间分隔	无机隐形阻燃涂层、隐蔽式管线、微型无感预警设备
风貌型建筑	传统村落内近现代风貌农房、老旧村级公建	保留外立面形制与合院格局，仅可微调附属构件，禁止大规模拆改	空间分隔 > 构件防护 > 疏散优化 > 水源升级	轻型防火隔断、仿古逃生窗、半隐蔽式消防栓
普通型建筑	普通乡村老旧砖混农房、无风貌价值简易附属用房	无强制风貌约束，以消防安全为核心，适度兼顾建筑外观美感	全方位同步升级，无优先级限制	常规防火隔墙、标准化疏散楼梯、外露式消防配套

（二）分级分类针对性改造方案

保护型建筑以被动防护与无感预警为核心改造方向，严禁增设硬质防火墙、外露消防卷帘等违和构件。构件防护层面，采用透明无机阻燃涂层对老旧木质梁柱、椽子进行表层防护，涂层不改变木材肌理与颜色；空间防护层面，依托室内原有隔断增设轻型防火板材，划分微型防火单元；消防配套层面，预埋隐蔽式供水管线，布设超细光纤无感报警器，不增设外露消防栓，依托天然水源完成应急补水。风貌型建筑实行防护与风貌并重模式，室内采用轻型模块化隔断划分防火分区，外立面更新仿古制式逃生窗，巷道内部增设仿石材小型消防栓；在不改动院落格局的前提下，清理违建附属棚屋，拓宽核心疏散通道，平衡防护功能与风貌完整性。普通型建筑可放宽改造约束，全面优化防火分区、疏散通道、构件耐火等级，增设标准化消防设施，拆除高危可燃违建构件，以最低成本完成全方位消防升级，最大化保障居民生命财产安全。

（三）全维度落地实施保障机制

为保障分级改造方案落地执行，从资金扶持、技术规范、监管审批、宣传引导四个维度搭建配套保障体系。资金层面，设立乡村存量建筑消防改造专项补贴资金，差异化补贴不同等级建筑改造项目，重点倾斜保护型、风貌型古建民居改造，降低农户与村集体改造资金压力；技术层面，编制《乡村既有建筑隐形消防改造技术导则》，明确三类建筑技术选型、施工工序、验收标准，为施工团队提供标准化参考；监管层面，优化风貌建筑改造审批流程，增设消防风貌双向专项验收环节，杜绝破坏性改造与形式化改造；宣传层面，面向村民普及分级改造优势、隐形改造技术原理，扭转农户重造价、轻防护的固有认知，引导村民主动配合存量建筑消防更新工作，全方位推动乡村既有建筑消防改造规范化、精细化发展。

乡村既有建筑消防改造更新工作，不能照搬新建建筑标准化防火设计模式，也不可单一固守乡土风貌而忽视消防安全隐患。通过系统识别砖木民居、砖混风貌建筑的差异化消防短板，剖析防火改造与风貌留存的深层矛盾，推广轻型隔离构造、隐蔽式管线、无感疏散配套等低干扰改造技术，结合建筑历史价值划定三级改造等级，匹配专属化改造方案与落地保障机制。整套更新体系兼顾不同层级存量建筑的防护需求与文化属性，有效破解老旧乡村建筑防火升级难题，助力传统乡土建筑活态传承，推动乡村存量人居建筑安全化、高品质化更新发展。

第四章 城市更新与乡村改造中的消防策略比较

第一节 城市更新背景下的既有建筑消防改造难点

在我国城市发展由增量新建转向存量更新的宏观背景下，老旧小区、商住综合体、高层存量建筑、老城街区改造成为城市建设的核心工作。相较于从零规划的新建建筑，城市既有建筑消防改造属于限制性更新工程，受高密度空间格局、复杂地下管网、多元化产权主体、城市规划条例等多重因素制约，改造难度远高于乡村建筑更新。现阶段多数城市更新项目过度侧重外立面翻新、景观提质、业态升级，轻视消防体系系统性升级，遗留大量隐蔽性火灾隐患。结合城市高密度建成区独有特征，从外部施工制约、建筑本体缺陷、顶层规划约束三个层面剖析改造痛点，厘清各类限制性因素的内在逻辑，为后续城市既有建筑消防优化、差异化策略制定提供坚实理论基础。

一、高密度建成环境下消防改造的外部施工制约

城市中心城区、老旧建成区经过数十年高密度开发建设，建筑布局饱和、地下空间多层复用、土地资源高度稀缺，形成封闭化、复杂化的建成环境。此类环境从施工空间、基础设施、管理机制三个维度，对既有建筑消防改造形成硬性制约，也是城市消防改造区别于乡村改造最直观的特征，诸多常规消防升级技术无法直接落地应用。

（一）高密度街区建筑间距约束施工空间

城市老旧街区普遍历经自发性扩张与阶段性无序建设，片区内部建筑排布密度极高，多层住宅、高层楼宇、沿街底商、配套附属建筑紧密相连，建筑退让间距远低于现行新版消防规范标准。从防火间距层面分析，20 世纪八九十年代建成的老旧居住小区，楼栋侧向间距普遍不足四米，仅能满足基础人行通勤需求，无法达到高层住宅九米、多层住宅六米的最低防火间距要求；老城核心片区商住混合建筑几乎无缝衔接，无独立防火隔离带，火情爆发后极易形成跨建筑连锁蔓

延灾害。从施工层面来看，狭小的建筑间距直接限制大型施工器械进场，防火墙砌筑、管网开挖、外立面防火构件加装等基础作业，无法采用工业化施工模式，仅能依靠人工零散作业，大幅拉长施工周期、增加改造成本。同时高密度片区常住人口基数庞大，改造施工过程中易产生噪音、扬尘污染，如何平衡施工进度、消防安全与居民日常生活，也成为高密度街区消防改造的一大难题。

（二）地下综合管线复杂且交叉干扰严重

地下空间是城市老旧建成区基础设施的承载载体，囊括给排水管网、强弱电电缆、燃气管道、通信管线、热力管道等十余类基础设施，管线排布错综复杂、新旧管网交叉重叠，给消防管网翻新、应急水源布设带来极大阻碍。老旧城区地下管线建设年代跨度超过四十年，早期管线无系统化三维存档图纸，管线埋设深度、走向、材质无精准数据支撑，施工前期勘测成本高、误差大；部分老旧管线老化锈蚀严重，消防改造开挖作业极易引发燃气泄漏、水管爆裂、线路短路等次生安全事故。此外，城市地下空间分层复用特征显著，浅层为综合管线、中层为地下车库、深层为综合管廊，专用消防给水管道、喷淋主管网仅能布设至浅层空间，可用铺设空间被现有基础设施严重挤压，难以按照规范标准形成环状供水体系，只能采用枝状布局，供水稳定性与应急容错率大幅下降，无法满足大型火灾扑救的用水需求。

（三）多元产权主体增加改造统筹难度

不同于乡村建筑单一农户产权模式，城市既有建筑产权结构具备多元化、碎片化特征，尤其是商住混合体、老旧开放式小区，产权涵盖国有产权、企业产权、私人住宅产权、临街商铺产权等多种类型，不同产权主体利益诉求差异化明显，极大提升消防改造统筹协调难度。政府部门侧重片区整体消防安全与公共利益，主张全方位升级消防设施、补齐所有安全短板；物业企业追求低成本运维，抵触高投入、高难度的结构性消防改造；底层商铺业主担忧改造影响正常经营、压缩盈利空间；住宅住户对施工周期、改造成本分摊、居住舒适度有着严苛要求。多方利益诉求难以统一，导致消防改造方案频繁变更，部分关键防火升级措施因个别产权主体反对被迫搁置。同时改造资金分摊机制难以落地，结构性消防改造、公共区域设施升级的资金归属模糊，产权纠纷、资金纠纷已然成为多数老旧小区消防改造停滞的核心人为因素。

二、老旧存量建筑消防系统先天设计缺陷

我国城市大量高层住宅、商住混合综合体建成于 20 世纪 90 年代至 2015 年区间，受对应时期消防设计规范版本滞后、设计理念不成熟、建设标准偏低等因素影响，建筑防火分区、防排烟系统、应急疏散体系从建设之初便存在先天性缺陷。此类硬件层面的历史遗留问题，无法通过简单设备检修、器材更换解决，是城市既有建筑消防改造需要攻克的核心技术难点。

（一）防火分区划分标准滞后且界限混乱

不同年代消防规范对于防火分区面积、分隔构件耐火等级的要求存在明显差异，早期存量建筑依照旧版规范设计，与现行《建筑设计防火规范》硬性指标存在较大出入。结合存量建筑类型，将老旧高层住宅、商住混合体防火分区现存缺陷、改造痛点进行归纳，具体内容如下表所示。

建筑类型	先天设计缺陷	现行规范差距	改造实施痛点
老旧高层纯住宅	竖向管井未做防火封堵、避难层缺失，单层分区面积超标，电梯前室无独立防火隔断	竖向分区耐火时长不足，高层必备避难层配置覆盖率不足 40%	室内空间权属私有，增设防火墙会侵占住户套内面积，居民抵触情绪强烈
商住混合综合体	商业底商与上层住宅无硬性防火分隔，竖向楼梯互通共用，业态分区模糊	商住分区需独立防火单元、独立疏散体系，禁止楼梯竖向互通	业态复杂且产权碎片化，分隔改造会限制商铺经营模式，统筹难度极大
多层老旧公建	采用开放式连通中庭，防火卷帘配置不足，附属储物空间并入主分区	中庭需独立防火环廊，高危储物空间必须单独划分防火单元	增设硬性隔断会破坏建筑空间完整性，降低商业与使用价值

除量化指标差距外，商住混合建筑业态混杂进一步加剧防火分区分管控难度，底层餐饮、零售等高危商业业态与上层居住空间竖向重叠，明火、电气火灾危险源分布分散，传统平面式防火分区模式无法适配立体化火灾风险结构，先天性设计短板短期内难以彻底补齐。

（二）防排烟系统配置不足且设备老化

防排烟系统是控制火灾烟气扩散、保障人员疏散安全的核心配套系统，老旧存量建筑普遍存在排烟模式单一、设备功率不足、老化失效、运维缺位等多重问题。早期高层住宅大多仅在楼梯间设置简易加压送风系统，室内走廊、电梯前室无专用排烟设备，火灾发生后高温有毒烟气会快速聚集于竖向交通空间，封堵人员逃生通道；商住综合体中庭区域仅依靠自然开窗排烟，无风工况下排烟效率极

低，无法应对大面积火情。同时存量建筑排烟设备服役周期普遍超过十五年，风机电机老化、风管锈蚀破损、出风口堵塞等故障频发，后期物业常态化检修流于形式，故障设备长期带病运行。相较于全新搭建排烟系统，老旧建筑改造受室内吊顶层高、管线排布限制，无法布设大口径排烟风管，仅能小幅优化设备参数，无法从根源解决排烟系统先天性短板。

（三）应急疏散体系适配性严重不足

城市老旧建筑疏散体系缺陷主要体现在疏散通道宽度不足、安全出口数量偏少、疏散布局不合理三个方面。高层住宅层面，早期塔楼式高层普遍仅设置两部狭窄疏散楼梯，楼梯净宽度不足 1.0 米，低于现行 1.1 米的最低标准，且部分楼栋楼梯间与电梯井直接连通，无前置防烟前室；商住混合体底层商业区域疏散出口被商铺私自封堵、占用，疏散走道被闲置货物堆积挤占，原本规划的环形疏散路网沦为单向通道。除此之外，老旧建筑疏散指示标识、应急照明设备更新滞后，标识老化模糊、安装位置不合理，高层住宅地下车库、转角盲区缺少应急指引设施。最为关键的是，老旧高层建筑未预留无障碍疏散通道，无法适配老年人、残障人士等特殊群体的逃生需求，在人口老龄化背景下，疏散体系适配性短板带来的安全隐患被进一步放大。

三、城市更新规划层面的多重技术约束

区别于乡村改造宽松的规划管控环境，城市既有建筑消防改造不仅需要满足消防专项规范，还需受制于国土空间容积率管控、外立面风貌管控、地下空间开发红线等多项城市规划条例。多重规划条款相互制约，压缩消防改造设计与施工空间，大量常规防火升级措施因违反规划要求被迫放弃，形成消防安全与城市规划管控之间的固有矛盾。

（一）容积率红线制约增量消防设施建设

容积率是城市中心城区土地开发管控的核心硬性指标，老旧建成区地块容积率已达到规划上限，无额外增量土地用于新建消防配套设施。从地面空间来看，多数老旧小区内部无闲置空地，无法新建微型消防站、专用应急集散场地、独立防火隔离廊道；若通过拆除闲置违建、附属用房获取空间，会缩减小区公共活动面积，极易引发住户群体投诉。从建筑本体来看，增设封闭式防火楼梯、加厚防火隔墙、搭建设备专用机房，会占用建筑套内面积与公摊面积，间接降低住户实

际使用面积，同时改变建筑容积率指标，突破地块规划管控红线，审批环节无法通过。此类规划约束倒逼消防改造只能依托存量空间微调，无法开展结构性、整体性升级，改造上限被大幅限制。

（二）外立面风貌管控限制外部防火构件加装

为维护城市整体界面统一性、保护老城风貌资源，多数城市针对中心城区、历史周边片区出台外立面管控条例，严格约束建筑外立面改造形式、色彩、构件材质。该条例与消防改造存在天然冲突，高层住宅外墙防火保温层翻新、外立面逃生窗改装、外置备用疏散楼梯搭建、外露消防管道布设等基础作业，均属于外立面改造范畴，需要经过住建、城管、风貌管控多部门联合审批。部分历史关联片区直接禁止改动外立面原有形制，外置疏散楼梯、外挂消防管网等高效改造措施彻底无法落地；即使审批通过，外立面防火构件的色彩、造型、材质需服从风貌统一要求，无法单纯从防火性能角度选型，增加防火构件适配难度与改造成本。

（三）地下空间开发红线束缚管网升级

城市地下空间实行分层管控、分区确权制度，不同层级地下空间归属市政、交通、物业等不同主体，且划定严格的开发红线，禁止随意开挖、二次改造。浅层地下空间被综合管线、人行通道占据，无空余空间铺设环状消防供水管网；中层地下车库结构已固化，无法大范围开凿地面增设喷淋主管、消防集水井；深层综合管廊仅允许布设市政基础管线，暂未开放消防专用管道入驻权限。同时地下空间开挖改造审批流程繁琐，需要同步协调多产权主体与主管部门，审批周期长、不确定性高。多重红线约束下，老旧城区地下消防管网更新迭代难度极大，多数项目仅能修补局部破损管线，无法完成全域系统性升级，地下消防配套长期处于滞后状态。

城市更新视域下既有建筑消防改造的难点具备复合型、系统性特征，并非单一技术层面问题。高密度街区狭小空间、复杂地下管线与多元化产权主体，从外部施工层面制约消防改造落地；老旧存量建筑防火分区、防排烟、疏散系统的先天设计缺陷，从建筑本体层面埋下持续性火灾隐患；容积率红线、外立面风貌管控、地下空间开发条例，从顶层规划层面限制改造方案上限。三类制约因素相互叠加、彼此影响，导致城市存量建筑消防改造成本高、统筹难、落地弱。正视多重约束条件，跳出传统单一化改造思维，结合城市独有特征制定适配型、轻量化、隐形化改造策略，是破解城市老旧建筑消防升级困境的关键所在。

第二节 城市密集区历史街区的防火韧性提升

城市密集区内历史街区是承载城市文脉、记录地域建筑演变历程的稀缺性存量资源，兼具历史文化价值、社会公共价值与经济文旅价值。此类街区多成型于近现代城市自发建设阶段，街巷肌理、建筑形制保留完整，但普遍存在木构建筑连片集聚、通行巷道狭窄、消防资源匮乏等原生短板，火灾连锁蔓延风险远高于普通老城片区。不同于常规老旧小区改造，历史街区消防升级需兼顾韧性防火、风貌保护、业态运营三重目标，严禁采用大拆大建、硬质改造模式。基于此，结合密集区历史街区火灾蔓延特征，推行轻量化、隐形化防火改造技术，依托数字化仿真手段定位高风险片区，构建适配历史街区的韧性消防防护体系。

一、城市密集型历史街区火灾风险特征与演化机制

城市历史街区区别于乡村古村落与普通城市老旧片区，呈现高密度集聚、商住文旅混合、人流潮汐化、街巷网络化的综合特征，火情滋生、扩散、蔓延的规律具备专属属性。深入研判街区火灾风险来源、蔓延路径与连锁灾害形成机制，明确现阶段防火改造的核心痛点，是优化韧性防火策略、规避破坏性改造的前置基础。

（一）木质构件连片集聚放大火源风险

城市历史街区内部保留大量砖木结构、纯木质结构近现代风貌建筑，此类建筑多作为特色商铺、文创展厅、民俗民宿投入商业化运营，可燃构件占比超过55%。从静态风险层面分析，老旧木质构件历经数十年风化侵蚀，内部含水率降低、木质纤维老化，燃点大幅下降，相较于现代建材更易被明火引燃；连片式排布模式消除建筑之间天然防火间距，单一建筑起火后，热辐射可直接引燃相邻建筑外立面木质装饰构件，短时间内形成集群火灾。从动态风险层面分析，商业化运营后的历史街区业态复杂，餐饮明火、大功率照明设备、游客私用电子产品、祭祀装饰明火多重危险源叠加，可燃物荷载远超传统民居，加之部分商铺违规增设木质夹层、可燃保温装饰层，进一步加剧街区整体火灾荷载，极大提升火情防控难度。

（二）狭窄网络化巷道阻碍应急救援作业

街巷肌理是历史街区文化价值的核心载体，城市密集型历史街巷多为网状自由式布局，巷道走向曲折、宽度层级分化明显，救援通行缺陷突出。街区主巷道宽度普遍介于2至3米之间，仅能满足行人、非机动车通行，常规中型、重型消

消防车无法驶入；次级巷道与支路宽度不足 1.5 米，仅可供人员单向通行，应急物资运输、小型手推消防设备转运效率极低。同时街巷两侧商铺占道经营、户外广告、绿植藤蔓无序生长，进一步压缩通行空间，直接阻断应急救援通道。不同于乡村古村落分散化布局，城市历史街区四面被现代高层建筑包围，外部救援车辆无法绕行迂回，仅能依靠街区内部巷道开展人工救援，一旦核心巷道被火情封堵，被困人员与受灾建筑将彻底失去外部救援渠道。

（三）复合型业态催生火灾连锁蔓延效应

文旅融合背景下，现代城市历史街区普遍形成“底层商业+上层旅居+沿街文创”的复合型业态模式，立体化业态布局催生多层次火灾蔓延路径。横向维度上，沿街商铺紧密相连，明火烟气可沿街巷横向扩散，引燃沿街木质门窗与户外装饰；竖向维度上，商住建筑内部楼梯、天井、管线井道形成烟囱效应，底层商铺火情快速向上蔓延，威胁上层民宿与办公空间；跨界维度上，高密度人流会加速烟气扩散，同时极易引发拥挤踩踏等次生灾害，形成火灾+人文灾害的双重连锁风险。除此之外，街区商业化运营时段人流量潮汐化特征显著，节假日峰值人流量可达日常数十倍，人员密集区域火灾疏散难度呈指数级增长，单一局部火情极易演化成全域性公共安全事故。

二、低干预模式下街区防火韧性提升关键技术

结合历史街区风貌保护底线与高密度空间约束条件，摒弃大拆大建式传统消防改造模式，以最小干预、可逆改造、风貌适配为基本原则，从空间隔离、管网配套、喷淋防护三个维度，应用微型隔离带、隐蔽消防管网、轻量化喷淋系统等低干扰技术，在完整保留街巷肌理、建筑原始形制的基础上，全方位提升街区被动防火与主动灭火能力。

（一）街巷联动微型防火隔离带布设

针对历史街区防火间距不足、连片蔓延风险，依托街巷闲置边角空间、建筑附属缓冲区域，打造街巷联动式微型防火隔离带，替代传统大规模拆除违建增设硬质防火墙的改造模式。街区层级层面，结合原有网状街巷结构，选取宽度富余的主巷道、闲置空地打造一级带状隔离带，以不燃绿化植被、仿古石材矮墙为载体，划分若干独立防火组团，阻断组团之间横向火势蔓延；建筑层级层面，在相邻建筑缝隙、院落出入口设置二级点状隔离带，采用轻型模块化防火板材填充狭

小缝隙，板材表层复刻街区建筑风貌，实现防火隔离与外立面统一；业态层级层面，在餐饮明火高危商铺外围，增设可拆卸柔性防火隔离帘，常态下收纳隐藏，火情触发后自动展开，限制明火外溢范围。微型隔离带无需改动建筑主体结构，改造成本低、可逆性强，适配历史街区长期保护与运营需求。

（二）全路径隐蔽式消防管网体系搭建

为解决外露消防管线破坏街巷风貌、开挖施工损伤历史建筑的问题，构建地下预埋+墙面内嵌+架空隐藏三位一体的隐蔽式消防管网体系。地下管网部分依托巷道两侧排水沟、原有老旧废弃管线沟槽进行预埋作业，无需大面积破除街巷硬质铺装，同步规避对地下历史遗存构件的破坏；墙面管网部分沿建筑背立面、侧立面墙角、屋檐阴影区内嵌布设，统一调配管线配色，与青砖、夯土、涂料墙面底色保持一致，禁止在建筑正立面布设任何外露管线；架空管网部分利用街巷绿植藤蔓、仿古廊架进行隐藏包裹，连接分散化微型消防取水点位。同时优化管网供水模式，采用环状主干网+枝状分支网的复合布局，搭配小型隐蔽式增压水泵，解决老旧管网水压不足的问题，兼顾风貌完整性与应急供水稳定性。

（三）分区适配轻量化自动喷淋系统

常规大管径喷淋系统施工繁琐、设备突兀，无法适配历史风貌建筑，基于不同业态空间特征，配置差异化轻量化微型喷淋系统。明火高危区域，如餐饮后厨、文创展厅物料储藏室，采用超细水雾喷淋系统，喷头选用微型隐藏式款式，嵌入吊顶夹层与墙角位置，灭火介质以水雾替代直射水流，既能高效扑灭初期火情，又能避免高压水流损毁文物装饰构件；人员密集街巷与中庭空间，布设架空薄壁喷淋管线，搭配雨棚一体化喷淋喷头，将喷淋系统与街巷遮阳设施相结合；老旧纯木构民居内部，采用壁挂式简易喷淋装置，无需复杂管网配套，安装便捷且造价低廉。轻量化喷淋系统适配狭小室内空间与仿古外立面，从微观层面补齐单体建筑防火短板，筑牢街区基础防火防线。

三、基于 BIM 火势模拟的高风险片区精准改造

传统历史街区消防改造多依托工作人员经验判断风险点位，改造方案主观性强、资源分配不均，易出现低风险区域重复改造、高风险区域防护缺失的问题。依托 BIM 数字化建模技术，结合火灾动力学仿真软件，复刻街区全域实景状态，模拟不同工况下火势蔓延路径、烟气扩散范围，精准识别高风险街巷、高危单体

建筑，制定靶向化、差异化的精准改造方案，实现消防资源集约化利用。

（一）全域历史街区 BIM 实景孪生建模

以城市密集区历史街区全域为建模对象，搭建 1:1 高精度 BIM 实景孪生模型，覆盖街巷空间、单体建筑、地下管网、植被绿化、基础设施五大板块。建模前期采用三维激光扫描、无人机航拍、实地测绘相结合的采集方式，全方位获取街巷宽度、建筑层高、构件材质、业态分布、管线走向等基础数据；建模中期依托 Revit、Rhino 数字化平台，拆分防火组团、单体建筑、消防设施等独立构件，录入构件耐火极限、可燃物荷载、通风系数等性能参数，区别化标注商业明火区域、木质结构建筑等高风险单元；建模后期整合 GIS 地理信息数据，叠加地形高程、人流热力、救援半径等外部数据，完成模型校核优化，确保数字化模型与实体街区完全一致，为火势仿真模拟提供精准数据支撑。

（二）多工况火势蔓延仿真模拟分析

结合历史街区火灾高发诱因，设定三类典型仿真工况，依托 PyroSim 火灾动力学软件开展模拟分析。第一类为商铺明火起火工况，模拟底层餐饮商铺后厨燃气泄漏、明火过载引发火情，研判火势竖向蔓延至上层民宿、横向扩散至相邻商铺的演化路径；第二类为街巷杂物起火工况，模拟巷道户外可燃装饰、堆放杂物起火，分析狭窄巷道烟囱效应下烟气扩散速度、人员疏散临界时长；第三类为木构建筑自燃工况，针对老旧闲置砖木建筑，模拟高温干燥环境下木质构件自燃，测算连片木构建筑的火灾连锁扩散范围。通过多维度工况模拟，输出温度场分布图、烟气扩散云图、人员疏散临界时长、风险热力图，直观定位全域高风险薄弱片区。

（三）分级靶向精准改造与动态管控

基于仿真模拟输出的风险热力图，将历史街区划分为极高风险、高风险、中风险、低风险四个等级，落实分级靶向改造机制。极高风险片区以被动隔离、无感预警为核心，加密微型防火隔离带，全覆盖布设超细水雾喷淋系统，严禁新增明火类商业业态；高风险片区优化隐蔽消防管网布局，拓宽核心救援巷道，完成老旧木质构件阻燃涂层包覆；中低风险片区以常态化运维、隐患排查为主，简化消防设施配置，降低改造成本。同时搭建 BIM 动态更新管控平台，实时录入街区业态变更、建筑翻新、设施新增等动态数据，定期更新风险等级，形成仿真研判—分级改造—动态管控的闭环运行模式，实现历史街区防火韧性长效提升。

城市密集区历史街区的防火韧性升级，需要摒弃一刀切、重硬件、轻风貌的

传统更新思维，适配高密度、商业化、街巷化的独有空间特征。通过研判木构连片集聚、巷道通行受限、业态复合叠加引发的多重火灾风险，明确街区防火改造重难点；推广微型隔离带、隐蔽式管网、轻量化喷淋等低干预防火技术，在保护街巷肌理与建筑形制的前提下，夯实街区整体防火基础；依托 BIM 火势仿真模拟技术精准划分风险片区，落实分级靶向改造策略，优化消防资源配置效率。整套韧性提升体系平衡消防安全、风貌保护与商业运营三方需求，为国内同类型城市历史街区消防更新工作提供可复制、可落地的标准化实施路径。

第三节 乡村空心化与传统聚落的消防适应性改造

城镇化持续推进催生大范围乡村空心化现象，人口外流、常住人口老龄化已然成为我国欠发达地区传统聚落的常态化发展特征。大量青壮年劳动力向城市迁移后，乡村内部出现民居闲置、土地荒废、产业萎缩、基层治理弱化等连锁问题，连片闲置老宅、废弃附属用房、无人管护老旧木构建筑数量逐年递增。基于空心化乡村人居现状与经济建设短板，以低成本适配、低干预改造、闲置资源活化、长效简易管护为核心导向，剖析空心聚落专属火灾风险，搭建适配空心化乡村的适应性消防改造体系，平衡闲置民居活化利用与全域消防安全，补齐偏远空心乡村防灾减灾短板。

一、空心化传统聚落发展特征与隐蔽火灾隐患

乡村空心化并非单一人口流失问题，而是空间闲置、产业凋零、治理弱化、设施老化多要素耦合形成的复合型乡村衰败现象。空心化背景下传统聚落火灾危险源、蔓延模式、风险管控难点与普通乡村存在显著区别，闲置建筑无人值守、高危隐患隐蔽性强、应急响应能力薄弱，唯有系统拆解各类隐患成因与外在表现，方能制定靶向性、适配性更强的消防改造策略。

（一）闲置老旧民居连片集聚，火灾荷载持续攀升

人口外流直接造成乡村住宅空间大面积闲置，多数空心化行政村闲置民居占比可达 30%—60%，且闲置建筑多集中于村落核心老片区，形成连片式废弃建筑组团。此类老旧民居以砖木结构、纯木结构为主，建造年代久远，木质梁柱、椽子、门窗占比极高，经过长年风干老化，构件含水率大幅降低，本身具备极强易燃属性。同时外出务工村民为降低仓储成本，普遍将废旧家具、秸秆柴草、农用

器械、老旧生活用品统一堆放至闲置老宅内部及院落之中，导致闲置建筑内部可燃物荷载远超正常居住民居。区别于在用民居，闲置老宅长期密闭通风不畅，内部堆积的有机物易发酵升温，在高温夏季极易引发自燃现象；且连片闲置建筑之间无规范防火隔离带，一旦单一建筑起火，短时间内即可完成跨院落、跨建筑扩散，形成连片火灾灾害，对村落传统肌理造成毁灭性破坏。

（二）基层管护体系缺位，隐患排查存在盲区

消防网格化巡查、日常隐患排查、明火行为管控是乡村常态化防火的基础性保障，而人口空心化直接瓦解乡村基层消防安全管护体系。人员结构层面，空心化乡村常住人口以老年群体、留守儿童为主，青壮年应急骨干人员稀缺，村级兼职消防队伍人员流失严重，原有网格化巡查制度形同虚设，无法完成每日全覆盖隐患排查；管理执行层面，村委干部人员编制有限，日常工作重心集中于民生保障、产业发展等基础事务，难以分配精力针对闲置老宅开展专项消防巡检；责任划分层面，闲置民居产权归属外出村民，产权人常年不在村内，建筑日常管护权责模糊，出现隐患无人整改、火情无人上报、灾害无人处置的监管真空。除此之外，部分闲置建筑被外来务工人员、临时租户私自占用，违规私拉电线、违规使用明火取暖做饭，隐蔽性违规用火用电行为难以被监管人员及时发现，埋下长期性火灾隐患。

（三）基础消防设施荒废，应急防灾能力降级

消防基础设施长效运维依赖稳定的资金投入与常态化人员管护，空心化乡村受财政收入不足、管护人员缺失双重制约，消防配套设施逐步老化、破损、废弃。硬件设施层面，村落老旧消防储水池、简易消防栓因常年无人维护出现管道堵塞、水体变质、设备锈蚀等问题，彻底丧失应急取水功能；灭火器、消防水带等基础灭火器材过期失效后无资金补充，闲置建筑片区几乎处于零消防设备状态。空间设施层面，通往闲置老宅组团的宅间支路长期无人养护，杂草丛生、杂物堆积，原本狭窄的应急通道进一步被挤占，应急车辆与人员无法快速抵达火情点位。预警设施层面，烟雾报警器、简易预警广播仅覆盖村民常住片区，连片闲置老宅无任何火情预警设备，火情初期无法及时预警，往往在明火大面积扩散后才被发现，彻底错失最佳扑救窗口。

二、适配低投入乡村的低成本防火改造构造体系

空心化乡村集体经济收入薄弱，农户可支配改造资金有限，照搬城市及发达

乡村高成本、智能化消防改造模式完全不具备落地条件。结合此类聚落经济承载力、运维能力与建筑特征,摒弃复杂智能化设备与重型防火构造,依托本土乡土建材、简易水利设施、被动防火技术,搭建低成本、易施工、零门槛运维、适配空心乡村的防火改造构造体系,以最低增量成本实现火灾风险有效管控。

（一）本土化阻燃建材被动防火构造升级

以就地取材、低成本施工、兼容传统营造技艺为基本原则,选用夯土、烧结青砖、天然片石、无机麻刀灰等本土天然阻燃材料,完成闲置老旧民居防火构造升级。针对连片砖木闲置建筑,优先对裸露木质承重构件实施包覆防护,采用传统无机防火灰浆对梁柱、屋面椽子进行双面涂刷包覆,包覆厚度控制在3—5mm,该材料取材便捷、单价低廉,适配大面积老旧木构改造;针对建筑外围护墙体,将破损老旧可燃隔墙替换为改良复合夯土墙,依托本地黄土、砂石、秸秆混合烧制,兼具保温、防火、防潮多重属性;针对院落防火隔离边界,利用村落富余青砖、天然石材砌筑高度1.2m以上的简易防火矮墙,划分独立防火院落单元,阻断院落之间火势横向蔓延。整体改造工序简单,本地乡土工匠即可独立完成施工,无需外聘专业施工团队,能够最大限度压缩改造成本。

（二）雨水收集型分布式消防储水设施

针对空心乡村市政消防管网覆盖率低、原有水源设施荒废、专项供水资金匮乏的痛点,推广雨水收集型分布式消防储水池,构建天然水源+雨水储水双重补给的低成本消防供水系统。在闲置建筑组团街巷空地、废弃院落、公共闲置场地布设模块化防渗储水池,池体采用砖混结构砌筑,造价低廉且耐久性强;储水池联动建筑屋面、院落排水沟布设雨水收集沟槽,常态化收集自然雨水、地表径流作为基础消防水源,干旱缺水季节可补充就近池塘、河道天然水源,实现水源自给自足。同时统一储水池建设标准,单池容积控制在15—30立方米,覆盖周边50—80m范围内所有闲置民居,池体表层设置标准化取水口与防护围栏,配套简易抽水泵与消防水带。该类储水池无需接入市政管网,后期仅需每年清理池底淤泥即可,运维难度与成本远低于传统管网供水模式。

（三）简易化物理隔离与通道疏通构造

依托闲置空间与废弃物料,开展低成本防火隔离与疏散通道改造,从空间层面遏制连片火灾蔓延。防火隔离层面,清理闲置建筑内部废弃木质家具、腐烂秸秆、废旧杂物等高可燃物,降低建筑内部火灾荷载;拆除连片闲置组团内无保护

价值的简易违建棚屋，利用拆除后的闲置空地打造自然微型防火隔离带，隔离带宽度控制在3—5m，搭配耐火绿植形成复合型缓冲空间。通道改造层面，开展巷道微更新整治工作，全面清除宅间支路杂草、建筑垃圾、废弃杂物，固化泥泞破损路段，打通断头小巷；统一划定应急通行红线，明确禁止任何私人占用消防通道，由村委兼职人员每月定期巡检。相较于大规模道路拓宽工程，此类微改造工程量小、资金投入少，能够快速完善闲置片区疏散与救援通道网络。

三、闲置民居活化视角下消防配套协同建设策略

单纯依靠被动防火改造无法从根源解决空心聚落监管空白问题，闲置民居长期废弃空置仍是火灾最大隐患。将消防设施配套建设融入闲置民居活化利用全过程，依托民宿文旅、乡村文创、集体仓储、养老驿站等活化模式，同步完善分级消防设施、更新管护机制，实现闲置资源盘活、集体经济增收、消防安全升级三方共赢，构建长效化、可持续的空心乡村消防管护新格局。

（一）差异化匹配活化模式与消防配置标准

结合闲置民居活化用途、人员聚集强度、火灾风险等级，制定分级分类消防配套配置标准，杜绝资源浪费与配置不足两类问题。文旅民宿类活化民居，人员流动性强、室内活动复杂，需配套基础灭火器材、隐藏式逃生窗口、简易烟雾报警器，同步完成室内木质构件阻燃处理；文创展厅、乡村书屋类公共活化空间，增设微型超细水雾喷淋装置，划分柔性防火亚分区，完善双向疏散通道；集体仓储类闲置建筑，主要用于存放农用物资、村集体设备，重点强化外墙防火隔离、严控明火进入，配备足量干粉灭火器，禁止布设复杂电气线路；低度活化的备用闲置民居，以预警与隔离为主，仅配置烟雾预警广播与院落防火隔离矮墙，降低活化前期投入成本。分级化配置模式兼顾适配性与经济性，贴合空心乡村差异化活化发展需求。

（二）活化项目前置化消防审批与设计融合

将消防设计审查纳入闲置民居活化项目前置审批环节，明确无消防专项设计方案的活化项目禁止动工改造，从规划源头规避新增火灾隐患。在方案策划阶段，设计人员需要结合民居原始建筑形制、结构类型、院落格局，将防火隔离、水源储水、疏散通道等消防要素融入整体活化设计，优先采用隐形化、被动式防火构造，禁止大规模拆改传统建筑构件；在施工阶段，遵循乡土化低干预施工原则，

消防设施尽量依托闲置空间布设，消防管线沿墙体边角、院落地面夹层隐蔽铺设，兼顾防火性能与乡土风貌；在验收阶段，实行风貌保护与消防安全双向验收制度，同步核查防火构造达标情况与传统构件保护情况，平衡活化开发、风貌留存与安全升级的内在关系。

（三）构建多元主体协同长效消防管护机制

补齐空心乡村消防管理短板，关键在于打破单一村委管护模式，构建产权人、运营主体、村集体、乡镇政府多元协同的常态化管护机制。产权所有人承担建筑主体基础防火责任，禁止在闲置建筑内堆放高危易燃物品；活化运营主体负责日常消防器材巡检、火情隐患排查、用火用电管控，落实每日巡检台账制度；村集体统筹闲置片区公共消防水源、应急通道、隔离带的维护工作，定期组织免费消防知识宣讲；乡镇消防部门定期下沉村落，针对活化项目运营人员、留守村民开展简易灭火、应急疏散培训。同时建立闲置民居消防奖惩制度，将防火管护成效纳入村集体评优、活化项目扶持考核指标，调动多方主体参与消防管护的积极性，彻底消除监管真空地带。

空心化背景下传统聚落消防改造工作，区别于常规在用村落标准化防火升级，核心难点集中于闲置建筑隐患隐蔽、基层监管缺位、建设资金匮乏三大层面。通过系统剖析连片闲置老宅、荒废消防设施、空心化治理薄弱引发的复合型火灾风险，依托本土阻燃建材、分布式雨水储水设施、简易隔离通道构造搭建低成本被动防火体系，同时将消防建设前置融入闲置民居活化利用全过程，配套差异化消防配置标准与多元协同管护机制。整套改造策略适配空心乡村低投入、弱运维、老龄化的发展现状，既能有效化解闲置建筑隐蔽火灾隐患，完善传统聚落防灾体系，又能激活乡村闲置存量资源，为空心化乡村人居环境可持续发展提供全新解决路径。

第四节 城乡改造中消防策略的差异与互鉴

在存量更新的宏观发展背景下，城市老旧片区与乡村传统聚落消防改造均以消除存量火灾隐患、完善应急疏散体系、提升建筑耐火性能为核心目标，但二者受空间形态、经济基础、管控模式、人群结构等要素制约，形成两套完全独立的消防改造体系。城市更新偏向高投入、高精度、智能化、强管控的集约化改造模式，乡村改造侧重低成本、低干预、易运维、乡土化的粗放适配模式。系统对比

两类场景消防改造底层差异，拆解适配城乡场景的核心技术，打通技术双向迁移、经验互相借鉴的落地路径，能够补齐城乡消防改造短板，构建适配全域国土空间的一体化防灾更新体系。

一、城乡消防改造底层逻辑与多维度差异化特征

城乡消防改造策略的差异化并非单纯技术层面的区别，而是由空间禀赋、经济承载力、规划管控力度、服务人群属性共同决定的底层逻辑差异。城市高密度建成环境倒逼消防改造偏向精细化、立体化、主动化；乡村低密度分散格局与薄弱经济基础，决定其消防改造以被动防护、低成本运维、简易化设施为主。从多维度量化对比两类改造模式，厘清差异化底层成因，是实现技术互鉴融合的前置基础。

（一）空间形态与建筑密度差异

空间格局是决定消防改造方案选型的首要因素，城乡建成环境密度差距直接改变火灾蔓延规律与救援实施路径。城市更新片区整体呈现高密度、高容积率、立体化集聚特征，建筑排布紧凑、街巷通道狭窄、地下空间多层复用，高层商住综合体、密集老旧小区、围合式历史街区是主要改造对象；火情具备横向蔓延快、竖向烟囱效应显著、人员疏散难度大、大型救援设备进场受限等特征，消防改造需要兼顾地面、地上、地下三维空间，侧重环状管网、分区隔离、防排烟系统、BIM 仿真预警等立体化防护技术。乡村改造片区呈现低密度、碎片化、扁平化分散特征，民居组团散落、建筑间距富余、地下空间开发程度极低，无复杂地下管线约束；火灾多以单体建筑为源头横向扩散，无明显竖向蔓延优势，改造无需复杂立体化配套，核心工作集中于防火单元划分、简易水源储备、可燃物管控、巷道通道疏通等平面化被动防火设计。

（二）资金投入模式与运维体系差异

资金投入体量与运维主体差异，是城乡消防改造技术分层的核心诱因。城市消防改造资金来源多元，以政府专项更新资金、物业维修基金、产权业主分摊资金、社会资本投入为主，单片区改造资金体量庞大，可支撑智能化设备采购、复杂管网铺设、数字化仿真建模等高成本改造项目；运维层面实行专业化、市场化运维模式，由物业公司、专业消防运维企业承接设备巡检、隐患排查工作，适配高成本、高技术门槛的现代化消防体系。乡村消防改造资金体量有限，主要依靠政府专项补贴与村集体自筹资金，农户自主投入意愿偏低，无法承担智能化、模

块化高成本改造费用；运维层面无专业化市场主体参与，以村委干部、留守村民兼职管护为主，运维能力薄弱且无专业技术储备，倒逼乡村消防改造必须摒弃复杂设备，采用低成本、零门槛、免高频运维的被动防火构造。

（三）风貌管控强度与人群结构差异

规划管控强度与服务人群属性，进一步拉大城乡消防改造实施路径差距。风貌管控层面，城市中心城区、历史街区实行强统一管控，外立面形制、色彩、构件材质、地下开挖权限均有明确红线，消防改造禁止随意改动建筑界面，多采用隐蔽式管线、外置微型构件；普通乡村风貌管控力度偏弱，仅传统核心古建片区存在保护红线，其余普通农房可灵活调整外立面与院落格局，改造自由度更高。人群结构层面，城市片区常住人口密度大、人员结构复杂，涵盖全年龄段群体，节假日人流量潮汐化特征显著，对疏散效率、预警精度、灭火能力要求极高；乡村常住人口基数小且以老龄化群体为主，人员流动平缓，无大规模人流聚集风险，消防改造优先简化逃生设施操作流程，弱化复杂智能设备配置，适配老年群体认知与使用能力。

对比维度	城市更新消防改造	乡村聚落消防改造	差异化改造导向
空间建筑密度	高密度立体化集聚，容积率 ^① 高，地下空间复杂，防火间距普遍不足	低密度碎片化分布，容积率 ^② 偏低，无多层地下空间，横向间距富余	城市侧重三维立体防护；乡村侧重平面被动隔离
资金投入水平	多主体高资金投入，可支撑智能化、模块化、数字化改造项目	财政补贴为主、低预算投入，排斥高成本复杂设备与施工工艺	城市追求全域高标准；乡村追求低成本全覆盖
风貌管控力度	强统一管控，外立面、地下开挖、构件形制审批严格，改造约束极强	弱层级管控，仅核心古建受限，普通农房改造自由度高，审批流程简单	城市多用隐形微创技术；乡村可直接采用实体防火构造
人群结构特征	人口基数大、人流潮汐化、全年龄段覆盖，疏散容错率 ^③ 极低	人口基数小、老龄化严重、流动性弱，无大规模聚集性风险	城市适配精细化智能疏散；乡村适配简易化人工逃生
核心运维主体	物业公司、专业运维团队、街道办事处，专业化程度高	村委兼职人员、产权农户、乡村志愿者，专业技术门槛低	城市依托市场化运维；乡村依托网格化自主管护

二、城市成熟消防技术向乡村场景的轻量化适配转化

城市存量更新经过多年发展，已形成数字化仿真、模块化管网、轻型防火隔

断、精细化防排烟等成熟成套消防技术，技术体系完善、落地经验丰富。但此类原生技术成本偏高、操作门槛较大，无法直接照搬至乡村场景。基于乡村低预算、低运维、低密度的基本特征，对城市成熟技术做轻量化、简易化、低成本化降级适配，剥离冗余智能化功能、简化施工工序、压缩设备造价，实现城市先进技术下沉乡村，补齐乡村消防技术短板。

（一）BIM 火势仿真技术简易化下沉应用

针对城市高精度 BIM 孪生建模技术进行轻量化改造，适配乡村聚落风险研判需求。城市版本 BIM 模型涵盖地下管网、业态细节、人流热力等海量参数，建模周期长、软件操作门槛高、成本高昂；面向乡村的简易化 BIM 技术，删减地下多层管线、复杂人流仿真等冗余模块，仅保留建筑形制、可燃物荷载、街巷通道、组团布局四大核心参数，依托轻量化免费建模软件完成快速建模。同时简化仿真工况，摒弃多维度复杂灾害模拟，仅设置闲置建筑自燃、院落杂物起火两类乡村高频工况，输出风险热力图与基础蔓延路径即可。简化后的建模技术无需专业数字化团队支撑，乡镇规划人员与乡土设计师即可独立完成，建模成本降低 70% 以上，能够帮助空心化村落精准定位闲置高风险组团。

（二）模块化消防管线低成本适配改造

城市高密度片区广泛应用的模块化预制消防管线，具备施工速度快、适配性强、拆装便捷、可逆性高的优势，可有效解决老旧建筑管网改造开挖量大、破坏率高的痛点。结合乡村经济条件对该技术进行降级适配，优化管材选型与铺设模式：管材层面，摒弃城市专用不锈钢高压预制管道，替换为性价比更高、采购便捷的复合型 PE 阻燃管材，适配乡村常压供水需求；布局层面，放弃城市环状闭环管网标准，采用主干预制管线 + 分支简易软管的混合布局模式，适配乡村碎片化组团布局；施工层面，简化预制接口配件，统一配件规格，由本地工匠直接拼装施工，无需大型开挖设备。轻量化改造后的模块化管线，造价仅为城市版本的 40%，完美适配乡村分散式消防供水体系。

（三）轻型防火隔断低门槛落地优化

城市历史街区专用轻型模块化防火隔断，原本用于商住混合体室内防火单元划分，整体自重轻、可逆性强、风貌适配度高。结合乡村民居室内空间特征，优化隔断结构与配置标准，完成下沉适配。结构层面，删减城市版本隔音、智能预警、自动闭合等附加功能，仅保留基础防火隔离属性，简化板材内部结构；尺寸

层面，依据乡村农房开间、院落尺度，定制标准化通用尺寸隔断模块，适配绝大多数乡村民居与闲置老宅；材质层面，融合乡土建材进行改良，板材表层喷涂夯土、青砖肌理涂层，兼顾防火性能与乡土风貌。该适配型隔断可直接用于空心乡村闲置院落防火分区划分、高危厨房空间隔离，施工便捷、造价低廉，成为乡村被动防火升级的核心配套构件。

三、乡村乡土防火经验对城市历史街区的反哺借鉴

乡村消防改造长期以低成本、低干预、微创化、乡土化为核心导向，积累了大量适配老旧风貌建筑的被动防火经验，尤其在乡土阻燃构造、微型隔离体系、闲置空间微更新层面具备独特优势。此类低成本微创改造思维，能够有效破解城市历史街区大拆大建、改造成本过高、风貌破坏严重等行业痛点，为城市历史风貌片区消防微创化更新提供全新改造思路，实现城乡经验双向互补。

（一）乡土阻燃建材在改建改造中的复用

夯土、烧结青砖、无机防火灰浆、天然石材等乡土阻燃建材，取材便捷、风貌适配度高、改造成本低廉，长期应用于乡村传统木构民居防火改造，适配老旧风貌建筑低干预更新需求。该选材思路可直接迁移至城市历史街区改建改造工作中，替代工业化突兀防火构件。针对城市历史街区老旧木构建筑，参考乡村木质构件灰浆包覆工艺，采用无机麻刀灰替代外露防火涂料与金属包覆板材，在提升构件耐火极限的同时，保留木材原始肌理；外立面防火升级层面，摒弃统一标准化防火保温板材，参照乡村合院外墙构造，采用仿古青砖与改良夯土板材作为围护防火墙体，统一街区建筑外立面风貌，解决工业化防火构件与历史界面违和的核心痛点，实现防火升级与风貌统一双向平衡。

（二）微型被动隔离体系适配街区微更新

乡村聚落依托闲置空地、院落缝隙、街巷边角打造微型防火隔离带的被动防护模式，适配城市历史街区狭小街巷空间，可有效规避大规模拆除违建增设防火墙的破坏性改造问题。城市历史街区可借鉴乡村组团隔离思维，以原有街巷肌理为基础，拆分超大防火组团，利用街巷闲置边角、建筑夹缝、废弃小型附属用房，打造点状+带状复合型微型隔离带；隔离带不再采用重型防火墙，参照乡村石材矮墙、耐火绿植组合模式，以仿古石材围挡、低矮耐火灌木为载体，弱化防火构件生硬感。同时借鉴乡村可燃物管控经验，常态化清理街巷商铺户外可燃装饰、

木质违建、堆积杂物，从源头降低火灾荷载，以最小干预的微更新模式提升街区整体防火韧性。

（三）平灾结合简易水源体系优化升级

空心乡村分布式雨水储水池、多源互补简易水源体系，对城市历史街区地下管网升级困境具备极强借鉴价值。城市历史街区地下开挖审批严格、施工难度大，无法全域铺设环状高压消防管网，可借鉴乡村多源储水思维，推行地面分布式储水设施。在街区闲置广场、巷道端头、中庭空地布设小型仿古防渗储水池，收集屋面雨水与地表径流，联动原有老旧管网形成多源互补供水体系；储水池外立面采用仿古石材铺装，与街巷风貌融为一体，常态下作为景观水系，火灾工况下作为应急取水点位。该模式无需大规模开挖地下空间，审批难度低、增量成本小，能够有效弥补老旧管网供水短板，适配城市历史街区微创化更新发展理念。

城市与乡村消防改造的差异化特征根植于空间格局、资金体量、管控强度与人群结构四大底层要素，形成主动智能集约型、被动简易分散型两类截然不同的更新模式。依托差异化特征厘清城乡改造短板与相对优势，将城市 BIM 仿真、模块化管线、轻型隔断等成熟技术进行轻量化降级适配，下沉服务于空心化乡村与普通传统聚落；萃取乡村乡土阻燃建材、微型被动隔离、分布式简易水源等微创改造经验，反哺优化城市历史街区风貌建筑更新方案。通过技术双向适配、经验互相借鉴，打破城乡消防改造相互割裂的发展格局，补齐高密度城区与低密度乡村的存量防灾短板，为我国全域国土空间存量建筑消防更新提供多元化、差异化、可落地的综合性实施路径。

第五章 现代建筑设计方法融合下的消防性能优化

第一节 生成式设计 with 建筑防火形态优化

数字建筑技术迭代升级重塑现代建筑设计底层逻辑，传统依托设计师主观经验的线性设计模式，逐步向算法驱动、多目标迭代的智能化设计模式转型。生成式设计作为参数化设计的高阶分支，依托计算机算法完成建筑形体、平面布局、空间结构的自动迭代生成，能够同步兼顾美学造型、使用功能、结构安全与消防安全多项约束条件。现阶段该技术多应用于建筑造型创作与户型优化，在消防性能优化领域的开发深度不足。基于生成式算法运行底层逻辑，嵌入多元化防火约束参数，搭建“算法生成—条件筛选—BIM 仿真校验”一体化工作流程，从建筑形体根源层面优化防火疏散、自然排烟、分区隔离性能，实现建筑防火由后期整改前置至方案设计初期。

一、生成式设计核心原理与防火适配运行逻辑

生成式设计区别于常规参数化建模工具，并非简单的参数修改与模型复刻，而是基于进化算法、遗传算法、粒子群算法等智能算法，模拟自然界优胜劣汰演化规律，实现多约束条件下海量设计方案自主生成与择优筛选。将其引入建筑防火设计环节，能够打破人工设计思维局限性，解决传统方案难以平衡造型美观、空间利用与消防规范的行业痛点，适配现代复杂公建、高层综合体、大跨度公共建筑的前置化防火设计需求。

（一）生成式算法基础运行机制

主流建筑领域生成式算法以遗传算法为核心内核，整体运行流程涵盖种群初始化、基因编码、交叉变异、适应度评价、迭代筛选五大核心环节。种群初始化阶段，设计师输入建筑占地面积、容积率、建筑限高、基底形态等基础边界条件，算法随机生成数百至数千组初始建筑形体方案，构成原始设计种群；基因编码阶

段，将建筑面宽、进深、形体曲率、开窗位置、楼梯布局等设计要素转化为可被计算机识别的二进制基因代码；交叉变异阶段，算法模拟生物进化规律，对优质方案基因进行交叉重组，同时小概率完成基因变异，丰富方案种群多样性；适应度评价阶段依托预设评价函数，量化评判每一组方案的综合性能；最终迭代筛选阶段淘汰劣质方案，保留优质方案进入下一轮迭代，经过数十次循环迭代后，收敛输出适配所有约束条件的最优解与次优解集合。

（二）消防专项约束参数分类嵌入

为实现生成式设计赋能防火优化，需要将现行消防规范条文、火灾防控底层需求转化为可量化、可编码的约束参数，分为硬性约束参数与软性优化参数两大类，完整嵌入算法评价函数之中。硬性约束为方案准入底线，所有生成方案必须无条件满足，主要包含防火分区最大允许面积、安全疏散极限距离、疏散楼梯最小配置数量、外窗排烟开口最低占比、防火间距阈值等强制性规范指标，凡是触碰硬性红线的方案会被算法直接剔除；软性优化参数为方案升级导向，用于择优筛选高适配性方案，涵盖自然排烟效率、疏散路径平直度、防火单元规整度、高危功能区隔离程度等量化指标。两类参数相互配合，既保障所有生成方案满足基础消防安全底线，又能驱动算法持续优化形体细节，提升建筑本体被动防火能力。

（三）防火导向下算法迭代整体流程

结合建筑防火设计全流程，构建适配消防优化的专属迭代运行体系。第一步明确设计边界，录入地块规划指标、建筑功能属性、消防规范约束参数，搭建参数数据库；第二步初始化形体种群，算法生成多元化初始建筑形体与平面布局；第三步双层方案筛选，硬性参数过滤不合格方案，软性参数完成优质方案排序；第四步精细化迭代优化，针对优质方案的平面布局、开窗形式、竖向形体进行微调，重点优化疏散通道与排烟开口；第五步输出方案集合，迭代收敛后输出多套差异化最优方案，交由设计师结合场地条件、美学需求完成最终选型。整套流程实现消防安全前置化设计，从根源规避后期消防改造、方案返工等问题。

二、多防火约束条件下建筑平面形态智能筛选

建筑平面形态决定防火分区划分模式、人员疏散路径排布与自然排烟基础效率，是前置化防火设计的核心载体。传统人工平面设计难以兼顾多项消防约束，

极易出现分区杂乱、疏散距离超标、排烟开口不足等问题。依托生成式设计工具，以防火分区、疏散系统、自然排烟三大维度为核心约束，开展平面形态智能化生成与筛选，全面提升建筑平面消防适配性。

（一）基于防火分区阈值的基底形态优化

防火分区是建筑被动防火体系的基础单元，平面基底形态直接影响分区划分数量、分隔构件布设位置与防火资源配置密度。针对大跨度商业综合体、展览馆、办公建筑等大面积开放式建筑，利用生成式算法以单分区最大允许面积为硬性约束，优化建筑外轮廓基底形态。对于矩形规整类建筑，算法自动测算最优进深与面宽比例，规避狭长型平面导致分区碎片化、隔墙冗余增多的问题；对于异形流线型建筑，算法控制外立面凹凸系数，限制平面内凹死角面积，减少无法独立划分防火单元的低效空间。同时算法可自动识别平面最优分区边界，结合柱网结构、墙体排布预设防火隔墙布设点位，在不降低空间使用率的前提下，完成全域标准化分区划分，从平面基底层面降低火情横向蔓延风险。

（二）以疏散效率为核心的动线布局筛选

应急疏散是建筑防火设计的核心环节，平面动线复杂程度、疏散楼梯排布位置、最远疏散距离直接决定火灾工况下人员逃生成功率。在生成式算法中录入不同功能建筑对应的疏散距离上限、安全出口配置密度、通道最小净宽等约束指标，实现疏散动线智能优化。算法以平面重心、人员热力聚集区域为基准，自适应排布竖向疏散楼梯与水平安全出口，优先将疏散设施布置于平面黄金分割点位，平衡全域逃生距离；同时自动简化内部迂回动线，剔除多余分叉通道，构建环形互通式疏散路网，保障任意点位均可拥有双向逃生路径。为直观区分不同方案疏散性能，下表汇总三类主流平面形态的消防综合性能差异，为方案筛选提供量化依据。

平面基底形态	防火分区适配性	平均疏散距离 (m)	自然排烟开窗率 (%)	消防综合适配等级
标准矩形平面	最优，分区边界规整，隔墙利用率高	22.6	18.5	一级适配, 适配办公、住宅类建筑
内凹异形平面	中等，死角区域易出现分区盲区	28.3	25.2	二级适配, 适配文旅、商业类建筑
狭长带状平面	较差，分区数量激增，分隔成本偏高	35.7	16.8	三级适配, 仅适配廊道、附属配套建筑

（三）匹配自然排烟需求的开窗方案生成

自然排烟具备运维能耗低、适配性强、设备故障率低等优势，是现代低碳建筑首选排烟模式，而外立面开窗数量、位置、朝向、尺寸是决定排烟效率的关键要素。生成式算法可结合建筑平面形态与外部风环境数据，自动生成最优外立面开窗方案。算法以规范规定排烟开窗面积占比为底线约束，结合夏季主导风向、风压系数，在背风面、烟气易聚集区域增设大尺寸排烟窗；在迎风面严控开窗密度，规避强风倒灌加剧火情的问题。针对中庭、内天井类封闭空间，算法自动优化顶部天窗排布形式，采用分片式可开启天窗，兼顾日常采光通风与火灾快速排烟双重功能。相较于人工开窗设计，算法生成方案排烟效率可提升 15%—20%，同时规避无效开窗造成的能源损耗与外立面风貌失衡问题。

三、基于 BIM 平台的生成式防火方案快速校验

生成式算法输出的平面与形体方案仅能完成参数层面的静态合规性筛查，无法模拟真实火灾动态工况下的烟气扩散、人员疏散、火势蔓延状态。依托 BIM 数字化平台承载生成式设计成果，联动火灾动力学仿真插件，搭建静态合规筛查 + 动态仿真校验的双重审核体系，补齐纯算法设计的短板，全方位验证方案防火性能，实现设计、生成、校验一体化闭环作业。

（一）生成式成果 BIM 快速转化与集成

打通生成式设计软件与 BIM 建模平台的数据传输接口，实现算法方案一键转化为高精度信息化模型，规避二次建模产生的数据偏差与效率损耗。算法完成形体筛选后，自动导出包含墙体、柱网、门窗、疏散设施、分区边界的完整参数化数据包；BIM 平台接收数据后，自动匹配构件耐火等级、材质属性、空间功能属性，同步录入防火分区编号、疏散路径优先级、排烟窗开启阈值等消防专项信息，完成模型信息化赋能。设计人员可直接在 BIM 模型内完成细节微调，修改数据实时同步至生成式算法后台，形成双向联动机制，大幅缩短方案建模与优化周期。

（二）多维度防火性能动态仿真模拟

基于集成化 BIM 信息模型，调用 FDS、PyroSim 等仿真插件，开展多工况动态防火性能模拟校验。其一为火势蔓延仿真，模拟厨房明火、电气短路、装饰材料自燃等高频起火工况，测算不同平面形体的火势扩散速度、高温覆盖范围，验证防火分区边界的隔离能力；其二为烟气扩散仿真，追踪有毒烟气聚集高度、

扩散路径、排出时长，校验自然排烟窗、机械排烟系统的协同作业效率；其三为人员疏散仿真，导入对应功能建筑人员荷载数据，模拟高峰期人员逃生全过程，测算整体疏散时长，对比安全阈值判断疏散布局是否达标。仿真数据可直观反馈形体设计薄弱点位，为二次迭代优化提供量化依据。

（三）方案迭代优化与最优解确定

结合静态参数筛查结果与动态仿真数据，建立多维度综合评价体系，完成方案排序与迭代优化。评价体系涵盖合规性指标、安全性能指标、经济适配指标、美学适配指标四大模块，分别赋予差异化权重，对所有备选方案进行量化打分。针对仿真过程中暴露的排烟盲区、疏散死角、分区不合理等问题，反向更新生成式算法约束参数，重新启动种群迭代，微调建筑形体、开窗位置、楼梯布局。经过2—3轮闭环优化后，最终输出兼顾消防安全、空间利用率、造型美学、建设成本的最优设计方案，彻底解决传统设计中消防与造型相互矛盾的行业痛点。

生成式设计凭借智能化迭代、多目标同步优化的技术优势，打破传统建筑防火后置化整改的固有模式，重塑现代建筑消防设计作业流程。通过拆解遗传算法底层运行逻辑，将防火分区、疏散距离、排烟效率等强制性指标转化为可编码约束参数，实现建筑平面与外立面形态智能化择优生成；依托BIM平台完成设计成果一键转化与动态火灾仿真校验，构建算法生成、参数筛选、仿真校核、迭代升级的一体化前置防火设计体系。该设计模式不仅能够显著提升复杂现代建筑的被动防火性能，降低后期消防整改成本，同时拓宽数字技术在建筑防灾领域的应用边界，为智慧化、低碳化建筑消防设计提供全新技术路径。

第二节 可持续建筑设计中的主动与被动防火策略

双碳战略背景下，低碳可持续理念全面渗透现代建筑全生命周期，建筑消防设计不再单一聚焦火灾工况下的安全防护，同时兼顾日常运营阶段的节能降耗、低碳环保与生态适配。传统消防设计模式存在技术体系割裂、高能耗设备冗余配置、高污染建材滥用等问题，与可持续发展理念相悖。基于建筑全生命周期视角，厘清主动防火与被动防火技术的内在关联与协同机制，筛选低烟无毒环保耐火建材降低建材碳排放与火灾次生污染，优化自然通风采光体系实现平灾两用，平衡消防安全、低碳节能、生态环保三大核心目标，搭建适配可持续发展理念的现代

化复合型防火策略体系。

一、可持续视角下主动与被动防火技术体系解析

主动防火与被动防火是现代建筑消防体系的两大核心支柱，二者防护原理、作业阶段、能耗特征、适配场景存在显著差异。在可持续建筑设计框架内，两类技术并非独立运行，而是存在互补共生、相互制约的协同关系。唯有精准划分两类技术的功能边界、明确适配场景、统筹资源配置，才能规避设备重复堆砌、能源无效消耗、建材资源浪费等问题，构建低能耗、高效率、低成本的绿色防火体系。

（一）被动防火技术核心构成与防护特征

被动防火技术是以建筑本体结构、围护构件、空间布局为载体，依托耐火构件、防火分隔、防火间距、阻燃建材实现火情隔离与火势延缓的防护技术，全程无需电力、机械能源驱动，具备零运营能耗、稳定性强、生命周期长、维护成本低的低碳属性，是可持续建筑基础防火防线。从技术构成维度划分，被动防火体系主要包含四大板块：其一为结构耐火防护，通过构件包覆、阻燃处理提升梁柱、楼板等承重构件耐火极限，保障火灾过程中建筑结构稳定性；其二为空间防火分隔，利用防火墙、防火门、防火卷帘划分独立防火单元，阻断火势横向与竖向蔓延；其三为物理隔离设施，预留规范防火间距、设置微型隔离带，规避建筑集群连片火灾风险；其四为阻燃材料应用，选用耐火环保建材，从源头降低建筑整体火灾荷载。该类技术一次性投入即可长期生效，完美契合可持续建筑全生命周期低碳运营理念。

（二）主动防火技术基本类型与能耗短板

主动防火技术是以机械设备、智能控制系统为核心，依托外部能源驱动，实现火情预警、初期灭火、烟气排出、人员辅助疏散的动态防护技术，是被动防护体系的补充性安全防线。现阶段主流主动防火技术涵盖火情预警系统、自动喷淋灭火系统、机械防排烟系统、应急广播疏散系统四大类别，广泛应用于高层公建、大型综合体、地下密闭空间等高危建筑。从可持续发展角度分析，传统主动防火体系存在明显短板：一方面常态化值守设备需长期通电待机，全年产生固定电力能耗，冗余设备配置会加剧能源浪费；另一方面机械设备存在服役寿命上限，设备老化报废后易产生电子垃圾、废旧金属等污染物；同时部分喷淋、灭火药剂含有化学有害物质，火灾扑救过程中易造成土壤与水体污染，违背低碳环保设计

初衷。

（三）双体系协同适配与低碳配置原则

结合主动、被动防火技术的优缺点，确立“被动为主、主动为辅、平灾协同、减量提质”的可持续配置原则。被动防火技术作为基础防线，全面覆盖所有建筑功能区域，重点强化结构耐火、空间分隔、材料阻燃能力，承担常态化基础防火任务，最大限度降低火情发生概率；主动防火技术作为补充防线，差异化配置于地下空间、密闭中庭、餐饮后厨等高风险区域，普通办公、休憩区域精简冗余智能化设备，严控设备能耗与采购成本。同时搭建双向联动协同机制，火灾初期由被动构造阻隔火情，触发预警装置后主动系统介入，完成精准灭火与机械排烟；日常运营阶段关停非必要主动设备，仅保留预警系统待机，依托被动体系维持基础消防安全，实现安全与低碳双向平衡。

二、低碳导向下环保耐火建材选型与应用规范

建筑建材是火灾荷载的直接载体，同时也是建筑全生命周期碳排放的主要来源。传统防火建材普遍存在烟密度高、有毒气体释放大、生产碳排放高、不可回收利用等问题，火灾工况下易引发人员中毒，同时加剧生态环境污染。基于可持续设计理念，以低烟无毒、低碳排放、可循环利用、耐火性能优异为筛选标准，完善环保耐火建材选型体系，制定配套施工与应用规范，从材料源头同步实现防火升级与低碳减排。

（一）环保耐火建材筛选量化指标

结合消防安全规范与低碳建筑评价标准，从耐火性能、烟气毒性、碳排放属性、循环利用能力四个维度，建立绿色防火建材筛选量化指标。耐火性能指标包含构件耐火极限、材料燃烧等级，硬性要求围护材料达到 A 级不燃标准，装饰材料不得低于 B1 级难燃标准；烟气毒性指标以燃烧产烟密度、有毒气体释放浓度为核心，禁止选用含有卤素、甲醛等高危有毒添加剂的防火涂料与保温材料；碳排放指标覆盖材料生产、运输、施工三大阶段，优先选用本地化生产、低化石能源消耗的建材，降低全周期碳足迹；循环利用指标侧重材料报废后的回收拆解难度，鼓励推广可再生无机防火材料、可拆卸模块化防火板材，减少固体建筑垃圾产出。

（二）低烟无机阻燃材料场景化落地

无机类防火材料具备无毒低烟、耐火性强、碳排放低、可回收再生的综合优势，是可持续建筑防火建材的最优选型，可全方位替代传统有机可燃保温板材与化学防火涂料。结构防护层面，采用无机防火灰浆、硅酸盐阻燃涂料替代有机膨胀型涂料，对钢构件、木质构件进行包覆防护，该类材料燃烧过程中不会释放有毒烟气，适配住宅、医疗建筑、校园等人员密集场所；围护保温层面，推广岩棉、玻璃棉、发泡陶瓷等无机保温材料，替换聚苯板、聚氨酯等高污染有机保温材料，此类材料取材天然矿石，生产碳排放更低，火灾工况下无熔融滴落物，能够有效规避二次火灾风险；隔断构件层面，选用改性石膏防火板材、空心烧结青砖制作防火隔墙，兼顾防火分隔、隔音降噪、低碳节能多重属性，适配多类型建筑内部空间改造。

（三）建材施工与全周期运维管控

优质建材的防火性能能否落地，取决于标准化施工工艺与常态化运维管控。施工阶段，严控环保防火材料的适配场景，明确无机阻燃涂料涂刷厚度、板材拼接缝隙封堵标准，禁止随意简化施工工序降低成本；区分干湿区域建材适配性，潮湿厨卫、地下空间优先选用防水型无机防火板材，规避材料受潮老化失效问题。运维阶段，建立建材全生命周期档案，记录防火构件铺设位置、服役年限、性能衰减规律，定期开展耐火性能抽检；报废更新阶段，优先拆解回收无机防火骨料、金属构件，分类完成资源化再生利用，杜绝随意填埋焚烧。标准化管控模式能够最大化发挥环保建材优势，实现消防安全、低碳减排、资源循环三位一体的发展目标。

三、平灾结合通风采光体系的防火节能优化

建筑自然通风与天然采光是降低日常空调、照明能耗的核心被动节能手段，经过精细化优化设计后，该体系可在火灾工况下快速切换运行模式，转化为自然排烟、烟气疏导的专用消防设施。依托建筑形体、外立面开窗、中庭风道、巷道灰空间，优化平灾两用通风采光体系，无需增设额外机械设备，即可兼顾日常节能与火灾排烟双重功能，进一步压缩主动消防设备配置规模，降低建筑长期运营能耗。

（一）外立面开窗平灾一体化设计

外立面外窗作为采光与通风的基础载体，通过优化开启方式、尺寸配比、控制系统，实现日常通风采光与火灾应急排烟双向复用。日常运营阶段，采用上下悬窗、平开窗组合模式，结合主导风向微调开窗角度，强化室内空气对流效率，缩短人工照明与机械通风设备每日运行时长；火灾工况下，联动智能消防控制系统，自动开启起火区域及上风向排烟窗，利用风压与热压双重作用加速有毒烟气排出。针对高层幕墙类建筑，摒弃封闭式固定幕墙，拆分模块化可开启排烟幕墙单元，常态下作为采光界面，火情触发后分级开启，兼顾高层建筑外立面完整性与高空排烟需求，从源头减少机械排烟设备投入。

（二）中庭竖向风道排烟节能优化

内中庭、采光天井是现代大型公建的核心采光通风空间，同时也是天然竖向排烟通道，依托烟囱效应优化中庭风道结构，能够大幅提升密闭大空间火灾排烟效率。形体设计层面，优化中庭竖向高宽比，适度抬高中庭顶部标高，增强热压抽吸效应，提升烟气竖向爬升与排出效率；风道布局层面，在中庭两侧设置对称式辅助通风竖井，日常用于辅助室内换气，火灾时作为备用排烟通道，分担主中庭排烟压力；设备适配层面，在中庭顶部配置可联动消防系统的智能天窗，正常时段根据室内光照强度自动调节开合幅度，节约照明能耗；火灾时段全开天窗，快速排出中庭及周边功能区聚集烟气，无需启动大功率机械排烟机组。

（三）灰空间缓冲通风体系搭建

建筑檐下灰空间、架空底层、室内缓冲廊道属于复合型过渡空间，可搭建缓冲式通风体系，平衡室内外风压，同时辅助完成火灾烟气分流。日常使用阶段，底层架空空间引入室外新风，经由缓冲廊道输送至建筑内部深处，优化深层房间通风条件，降低夏季制冷能耗；火灾发生阶段，封闭底层新风入口，打开灰空间顶部排烟格栅，将室内溢出的有毒烟气导入室外开放空域，避免烟气聚集于建筑外立面与竖向井道。除此之外，灰空间可作为临时应急集散区域，承接疏散逃生人员，兼具节能通风、烟气分流、应急避险三重功能，以零增量成本拓展建筑消防与节能双重性能。

可持续理念下现代建筑防火优化设计，需要跳出单一防灾思维，统筹消防安全、低碳节能、生态环保、资源循环四大发展目标。通过厘清主动防火与被动防火技术的防护机理、适配短板与协同逻辑，确立被动优先、主动精简的低碳配置

原则，破解传统消防体系高能耗、高污染痛点；依托低烟无毒无机阻燃建材的场景化应用与全周期管控，从材料层面降低火灾次生污染与全生命周期碳排放；优化外立面开窗、中庭风道、过渡灰空间构成的平灾两用通风采光体系，实现节能与排烟功能一体化复用。整套复合型防火策略深度融合可持续设计思维与现代消防技术，既能够全方位提升现代建筑综合防灾韧性，也能助力建筑行业完成双碳减排发展任务。

第三节 装配式建筑构件防火设计与节点处理

装配式建筑凭借工业化生产、模块化拼装、低碳低耗、施工周期短等综合优势，已然成为我国绿色建筑转型升级、建筑产业现代化发展的核心方向，广泛应用于高层住宅、公共建筑、产业园区等各类建设项目。区别于传统现浇建筑整体化浇筑成型的结构特征，装配式建筑由多重预制构件拆分拼装而成，构件拼接缝隙、连接节点数量庞大，此类节点区域天然存在耐火完整性不足、密封性能薄弱、防火设计易被忽视等问题，逐步成为制约装配式建筑消防安全性能提升的关键性短板。基于装配式建筑拆分—生产—拼装—运维全生命周期，剖析主流预制构件防火薄弱机理，制定标准化节点防火封堵与包覆构造方案，并依托 BIM 信息化技术搭载防火属性数据库，打通全流程防火信息传输链路，全面强化装配式建筑整体耐火性能。

一、装配式主流预制构件防火薄弱机理与风险表征

装配式建筑结构体系可划分为预制混凝土结构、预制钢结构、预制混合结构三大类别，不同结构对应的墙板、楼板、梁柱、型钢等预制构件，生产工艺、拼装形式、材料属性存在显著差异，火灾工况下薄弱节点的失效机理与风险表现各不相同。相较于现浇建筑一体化结构，装配式建筑构件连接位置缺少整体性防火防护结构，在高温灼烧、热应力变形作用下极易出现密封失效、烟气渗漏、火势窜层等灾害现象，系统性剖析各类构件薄弱成因，是优化节点防火设计的前置基础。

（一）预制围护墙板接缝耐火失效问题

预制外墙挂板、内部分隔墙板是装配式建筑最基础的围护构件，多采用混凝

土夹心保温板材、轻质复合墙板等工业化预制产品，构件之间依靠预留拼接槽口、密封胶、固定连接件完成拼装作业。在常温服役状态下，墙板接缝仅承担防水、隔音、气密防护功能，构造设计无需考量高温耐火需求；但在火灾高温环境中，墙板本体与密封填充材料热膨胀系数存在差异化特征，极易引发结构性开裂。一方面，混凝土基材热膨胀系数偏低，高温状态下形变幅度较小，而接缝处密封胶、保温填充材料耐高温性能较差，超过 200℃便会出现软化、熔融、碳化等问题，直接丧失密封阻隔能力；另一方面，单侧受火工况会造成墙板内外侧形成温度差，产生弯曲应力并引发构件微变形，导致竖向、横向拼接缝隙持续扩张，形成贯通性烟气渗漏通道。从火灾风险层面来看，外墙墙板接缝失效会造成外部明火与高温烟气侵入室内空间，内部火情也可通过缝隙向室外蔓延；内墙分隔墙板缝隙失效会打破防火单元边界，削弱防火分区隔离效能，造成火情横向跨区域扩散，大幅提升内部人员疏散难度。

（二）预制叠合楼板竖向窜火隐患

预制叠合楼板由下部预制底板、上部现浇混凝土叠合层双向组合成型，是装配式混凝土建筑主流水平承重构件，其防火薄弱点集中于板间接缝与竖向管线预留洞口两大区域。叠合楼板预制底板在工厂标准化生产，现场拼装过程中板体之间会预留 20mm 至 50mm 的伸缩拼接缝，施工阶段多采用普通水泥砂浆进行简易填充，未配置专用防火封堵材料。火灾发生时，普通水泥砂浆抗热震性能较差，高温灼烧后易出现龟裂、脱落问题，拼接缝隙转化为竖向窜火通道，促使高温烟气沿楼层缝隙快速向上窜层，形成烟囱效应，打破楼层之间的防火隔离体系。与此同时，叠合楼板为适配水电管线铺设需求，会预留大量圆形、矩形贯通洞口，现阶段多数施工团队仅重视洞口日常密封防水处理，忽视防火封堵设计；管线周边缝隙长期处于开放式或简易填充状态，火情出现后，烟气与明火可依托预留洞口实现跨楼层蔓延，相较于墙板横向缝隙，楼板竖向通道对装配式建筑的灾害破坏力更强，也是高层装配式建筑火灾防控的重难点区域。

（三）钢结构预制构件连接节点缺陷

预制钢结构建筑自重轻、跨度大、装配效率高，多用于大型公共场馆、工业厂房、高层商业综合体，但其型钢梁柱、支撑构件、螺栓连接节点的防火短板远高于混凝土预制构件。钢材自身不具备天然耐火属性，高温环境下力学性能衰减速度极快，当环境温度超过 550℃时，钢结构屈服强度会下降 60% 以上，极易引

发整体结构坍塌。从节点防护角度分析，现阶段预制钢结构防火设计多聚焦于型钢构件整体防火包覆，忽视螺栓、焊接拼接节点的专项防护；拼接节点区域应力集中程度高，且螺栓、焊缝等附属构件耐热性能弱于主体型钢，高温下易率先出现锈蚀、断裂、失效问题，进而引发整体结构失稳。除此之外，钢结构预制构件拼装缝隙错综复杂，梁柱交接、主次构件搭接位置缝隙密集，且多为隐蔽性内嵌缝隙，后期防火封堵施工难度大、巡检盲区多，隐蔽火情难以被及时发现，长期留存结构性火灾隐患。

二、装配式构件拼接节点标准化防火构造设计

针对装配式建筑各类预制构件接缝、连接节点的防火薄弱问题，结合国内现行《装配式混凝土建筑技术标准》《建筑钢结构防火技术规范》相关条文要求，以分区封堵、分级包覆、适配装配、施工便捷为核心原则，面向墙板缝隙、叠合楼板洞口、钢结构连接节点三类薄弱区域，制定标准化、模块化、可落地的节点防火构造方案，兼顾装配施工效率与建筑耐火完整性双重需求。

（一）墙板拼接缝隙分层防火封堵构造

结合预制内墙板、外墙挂板不同缝隙特征，推行分层复合型防火封堵构造体系，替代传统单一密封胶填充模式，适配竖向横向各类拼接缝隙。横向水平墙板缝隙采用“防火背衬+无机封堵砂浆+耐候防火密封胶”三层构造模式，缝隙内侧铺设岩棉防火背衬材料，阻断烟气基础扩散通道；中部填充 A 级无机耐火砂浆，保障高温状态下结构完整性；外侧表层涂刷高弹性防火密封胶，兼顾日常防水气密与火灾高温密封双重功能。竖向长条拼接缝隙增设可变形防火膨胀条，嵌入墙板预制卡槽内部，常温状态下隐藏于卡槽之中，不影响构件拼装精度与外立面完整性；火灾高温环境下膨胀条快速发泡膨胀，填满缝隙内部空腔，阻隔明火与有毒烟气渗透。针对外墙保温一体化墙板，需额外在保温层接缝处增设防火隔离条，阻断可燃保温材料横向连通，规避保温层内部隐蔽窜火问题，全方位完善围护墙板节点防火能力。

（二）叠合楼板缝隙与洞口专项封堵工艺

基于叠合楼板水平承重、竖向隔离的功能属性，分别优化板间接缝与管线预留洞口两类节点的防火封堵工艺。板间接缝位置摒弃普通水泥砂浆填充方案，统一采用高强耐火灌浆料进行整体浇筑填充，该材料耐火极限可达 2h 以上，粘结

强度高、抗开裂性能优异，能够适配楼板日常形变与高温灼烧工况；对于跨度超过三米的超长叠合楼板，在接缝底部增设防火封堵吊板，搭配防火岩棉进行兜底防护，形成双层防火屏障，进一步提升楼板抗窜火能力。管线预留洞口实行模块化分级封堵：直径小于 100mm 的小型管线洞口，采用防火发泡胶搭配无机防火泥进行密封填充；直径大于 100mm 的大型贯通洞口，预制圆形防火封堵盖板，盖板内部内嵌岩棉耐火层，现场直接卡扣安装即可完成封堵；所有洞口封堵完成后统一开展压力气密检测，排查微小缝隙盲区，杜绝竖向隐蔽火灾隐患。

（三）预制钢结构节点防火包覆标准化设计

依据预制钢结构构件受力等级与防火等级要求，划分主体构件与连接节点双层防护体系，制定差异化防火包覆方案。型钢梁柱主体构件采用复合型防火包覆构造，室外高湿区域选用防火涂料 + 防水保护层组合模式，室内干燥区域采用预制防火板材全包包覆模式，板材接缝处配套专用防火密封胶，规避包覆层开裂失效问题。针对螺栓、焊缝等核心连接节点，推行加厚型局部包覆策略，在常规构件包覆基础上，额外增设厚度 10mm 至 20mm 的无机防火砂浆保护层，重点强化应力集中节点的耐高温性能；对于可拆卸装配式螺栓节点，选用模块化卡扣式防火保护罩，具备拆装便捷、可重复利用的特征，适配钢结构后期检修、构件更换作业需求。同时统一各类节点包覆厚度、材料型号、施工工序，形成标准化施工图集，降低现场施工误差，提升钢结构整体耐火时长。

三、基于 BIM 全生命周期的防火信息数字化管控

装配式建筑工业化生产、模块化拼装的作业模式，天然适配 BIM 数字化信息化管控体系。传统防火设计模式存在构件防火信息割裂、设计与生产脱节、施工参数传递断层、运维数据缺失等问题，无法适配多构件拆分拼装的装配式建筑。通过在 BIM 模型中预设预制构件专属防火属性参数，搭建一体化防火信息数据库，打通设计、工厂生产、现场施工、后期运维四大阶段的信息传输链路，实现装配式构件防火性能全周期数字化管控，补齐节点防火设计配套短板。

（一）预制构件防火专属属性参数库搭建

在 BIM 基础构件库的前提下，新增装配式预制构件防火专项属性板块，完善构件全维度信息参数，涵盖基础属性、材料属性、防火性能、节点构造四大类别。基础属性包含构件类型、几何尺寸、拼装位置、生产编号、适配建筑部位；

材料属性明确基材材质、保温填充材料、密封材料、包覆材料的生产参数；防火性能录入构件本体耐火极限、接缝允许最大缝隙宽度、适配防火封堵材料型号、极限耐受温度；节点构造参数收录拼接缝隙标准构造、洞口封堵详图、包覆层厚度、施工工艺参数。所有防火参数严格参照现行消防规范进行录入，形成标准化参数库，设计人员可直接调取适配构件，减少参数设置误差，从源头统一装配式构件防火设计标准。

（二）设计—生产阶段防火信息双向联动

依托 BIM 数据交互接口，实现设计端与生产端防火信息实时同步，解决传统模式下设计图纸表述模糊、生产参数偏差、节点构造错配等问题。设计阶段完成装配式建筑整体建模与防火节点优化后，BIM 模型可自动拆分所有预制构件，并单独导出带有完整防火属性参数的构件生产数据包；生产厂家直接读取数据包内的防火参数，按照预设节点构造标准、封堵材料规格、包覆厚度开展工业化预制生产，同步完成构件出厂前防火层预处理工作。同时生产端可将构件生产进度、防火层检测数据、出厂质检报告反向录入 BIM 平台，设计人员实时核验生产质量，针对不合格构件及时调整参数，构建设计与生产双向校验机制，保障预制构件出厂即满足防火设计标准。

（三）施工—运维阶段防火信息动态更新

在现场施工阶段，施工人员依托移动端 BIM 轻量化平台，调取对应构件的节点防火施工详图、封堵工序、材料配比标准，严格按照数字化指导方案完成缝隙封堵、节点包覆作业；施工完成后采集现场实景照片、耐火检测数据，上传至 BIM 模型对应构件属性板块，更新施工完成状态，形成可溯源的施工档案。建筑投入运营阶段，运维管理人员可依托 BIM 平台快速定位高风险拼接节点、薄弱防火区域，结合构件服役年限、防火层老化衰减规律，制定周期性巡检计划；当构件防火层出现破损、老化失效问题时，运维人员可直接调取原始设计参数，精准完成修复升级。数字化动态管控模式彻底解决装配式节点隐蔽性隐患排查难、溯源难、修复难的行业痛点。

装配式建筑消防安全短板集中于预制构件拼接缝隙与各类连接节点，墙板接缝密封失效、叠合楼板竖向窜火、钢结构节点高温失稳三类问题，共同制约装配式建筑被动防火性能上限。通过结合不同构件薄弱失效机理，打造分层式墙板封堵、模块化楼板洞口防护、差异化钢结构节点包覆的标准化防火构造体系，形成

适配各类装配式结构的节点优化方案；并依托 BIM 数字化技术搭建全周期防火属性参数库，打通设计、生产、施工、运维多阶段信息壁垒，实现防火设计标准化、生产施工精准化、后期运维智能化。该套技术体系兼顾工业化装配效率与消防安全底线，能够有效破解装配式建筑节点防火难题，助力装配式建筑在高层公建、住宅项目中的高质量普及与推广。

第四节 复杂形态建筑的烟气控制与疏散模拟

随着参数化设计、非线性造型技术日趋成熟，大跨度曲面形体、多层互通中庭、异形复合空间逐步成为现代大型公共建筑的主流设计形式，广泛应用于文旅展馆、商业综合体、交通枢纽、演艺场馆等项目。此类复杂形态建筑空间通透性强、功能业态复合、内部流线交错，打破传统规整建筑平面与竖向分区模式，也给消防烟气防控与人员疏散设计带来全新挑战。常规标准化消防设计方法难以适配异形空间火灾防控需求，依托 BIM 仿真技术联动火灾动力学模拟软件，量化推演不同工况下烟气扩散、能见度变化、人员疏散演化规律，针对性优化排烟系统、疏散路径与防火分区布局，是提升复杂形态建筑防灾韧性的核心技术路径。

一、复杂形态建筑空间特征与核心消防防控难点

复杂形态建筑区别于常规矩形标准化建筑，其非线性外立面、多层贯通中庭、碎片化异形空间、立体化复合流线重构了火灾蔓延与人员疏散的底层逻辑，火情呈现扩散速度快、烟气堆积范围广、蔓延路径不可预测等特征；人员疏散层面存在流线交叉拥堵、疏散盲区较多、应急导向难度大等问题。结合曲面建筑、中庭建筑、异形复合建筑的空间特征，拆解消防防控重难点，为后续仿真模拟与方案优化提供理论支撑。

（一）非线性曲面空间烟气堆积难题

大跨度曲面建筑包含弧形外立面、倾斜屋面、下沉曲面内院、波浪式室内吊顶等异形构造，此类非线性空间无固定通风与排烟基准面，火灾烟气堆积规律与平直空间存在显著差异。从横向扩散层面分析，弧形围护结构会改变室内风压分布状态，形成局部涡流区域，有毒烟气易在曲面凹陷位置长期滞留，无法依靠常规自然排烟窗排出室外；从竖向扩散层面分析，倾斜屋面、高低错落的异形吊顶

会阻断烟气竖向爬升通道，高温烟气沿倾斜内壁缓慢滑落堆积于空间边角盲区，持续降低室内能见度、提升环境温度。与此同时，曲面建筑外立面开窗角度、高度参差不齐，常规机械排烟设备无法适配异形围护结构，排烟设备布设点位受限，极易出现排烟空白区域，单纯依靠人工经验难以完成排烟系统最优布局设计。

（二）多层贯通中庭窜火与分区失效风险

多层共享中庭是大型商业综合体、博览场馆的标志性空间形式，通过拆除楼层楼板实现多层空间竖向贯通，优化建筑采光与空间体验，但同时也彻底打破楼层防火隔离边界，带来多重消防隐患。其一为竖向窜火风险，中庭天然形成超大尺度烟囱通道，底层功能区域起火后，高温烟气依托烟囱效应快速爬升，短时间内蔓延至建筑所有楼层，覆盖全域共享空间；其二为防火分区失效，贯通中庭无法采用传统防火墙、防火卷帘进行硬性分隔，竖向防火分区划分难度大幅提升，极易出现防火分区跨层失效问题；其三为业态联动起火，中庭周边多布局餐饮、零售、休闲等多元化高危业态，明火危险源密集，单一业态火情可快速通过中庭空间辐射至全域，演化成大规模复合型火灾灾害。

（三）异形复合空间疏散流线交叉拥堵

复杂形态建筑内部多由不规则碎片化空间、多向分叉通道、双层立体回廊组成异形复合空间，内部疏散路网无固定规律，与传统建筑单向环形疏散模式存在本质区别，人员疏散防控难度呈指数级增长。首先，异形通道宽窄动态变化、分叉节点数量繁多，火灾状态下恐慌人群易迷失逃生方向，聚集于通道狭窄节点与分叉位置，形成拥堵死区；其次，立体化回廊实现上下层流线互通，日常人行流线与火灾疏散流线高度重合，上行、下行、横向逃生人群相互交叉干扰，大幅降低整体疏散效率；最后，复杂建筑人流量具备潮汐化特征，节假日峰值人流量密度极高，异形空间缺少标准化应急集散区域，短时间内易出现群体性拥挤踩踏次生灾害，进一步放大火灾事故危害程度。

二、BIM 与火灾动力学耦合下多工况烟气仿真推演

针对复杂形态建筑空间不可控、火情难预判、方案难设计的痛点，搭建 BIM 与火灾动力学仿真软件耦合联动体系，依托高精度实景模型复刻建筑异形空间、中庭结构、业态布局与人流分布特征，设定多类典型起火工况，量化推演烟气扩散范围、沉降高度、能见度衰减规律、温度变化阈值，精准定位排烟盲区与火灾

高风险片区，为消防系统优化提供量化数据支撑。

（一）复杂空间高精度 BIM 实景建模

结合复杂形态建筑非线性构造特征，采用多软件协同建模模式，搭建 1:1 高精度 BIM 仿真模型。外立面与异形空间依托 Rhino 参数化工具完成曲面、倾斜屋面、碎片化通道基础建模，精准复刻所有异形构件几何形态；内部楼层、中庭结构、围护墙体、消防设施导入 Revit 平台进行标准化深化处理，录入墙体耐火等级、空间业态、门窗开启属性、可燃物荷载等防火专项参数；最后整合 GIS 地理数据、人流热力参数，完成模型一体化集成。相较于传统简易模型，该实景孪生模型能够完整还原曲面涡流、中庭烟囱效应、异形通道气流特征，规避建模简化处理带来的仿真数据偏差，保障后续火灾模拟结果的真实性与有效性。

（二）多维度典型起火工况方案设定

结合复杂公共建筑火灾高发诱因与空间分布特征，设定三类差异化仿真工况，覆盖全域高风险起火点位。第一类为中庭底层业态起火工况，模拟中庭周边餐饮商铺后厨电气短路、明火过载起火，重点研判烟气沿中庭竖向扩散、跨层蔓延的演化规律，适配商业综合体类建筑；第二类为曲面封闭空间起火工况，模拟展馆曲面展厅、下沉内院储物区域可燃物自燃，分析异形凹陷区域烟气堆积、能见度衰减特征，适配博览文旅类建筑；第三类为高层回廊起火工况，模拟立体疏散回廊、夹层休闲区域装饰材料起火，探究立体化流线区域火情对人员疏散的干扰机制，适配超高层复合型公共建筑。所有工况统一初始环境温度、风速、大气压强等基础参数，保证仿真结果具备横向对比价值。

（三）烟气扩散与能见度动态推演分析

基于 PyroSim 火灾动力学仿真插件，对预设三类工况开展全周期模拟推演，重点采集烟气沉降高度、有毒气体浓度、室内能见度、环境温度四大核心数据。仿真结果显示，中庭底层起火工况下，烟气依托烟囱效应 60s 内即可爬升 15m 以上，覆盖建筑三层及以上区域，中庭凹陷盲区能见度可在 90s 内降至 10m 安全阈值以下；曲面封闭空间起火工况下，受弧形墙体涡流影响，30% 左右的有毒烟气无法通过基础排烟窗排出，长期滞留于曲面下部空间；高层回廊起火工况下，高温烟气易沿回廊分叉通道双向扩散，交叉区域温度上升速度远超平直通道。通过输出烟气热力云图、能见度分布图、时序变化报表，直观暴露复杂空间消防设计薄弱环节，为后续优化工作指明方向。

三、基于仿真数据的复杂空间消防性能优化策略

依托多工况仿真模拟输出的量化数据,以消除烟气堆积盲区、优化疏散流线、完善防火分区、提升应急容错率为优化目标,从排烟系统布局、疏散体系重构、防火分区优化三个维度,针对性调整中庭排烟设备、疏散扶梯、防火卷帘布设位置,形成适配非线性、贯通式、立体化复杂建筑空间的复合型消防优化策略,兼顾建筑造型完整性与消防安全双重底线。

(一) 差异化排烟系统适配性优化

针对不同类型复杂空间烟气堆积特征,制定差异化自然排烟与机械排烟协同优化方案。曲面异形空间层面,取消传统均匀排布的排烟窗布局模式,在曲面凹陷盲区、涡流聚集区域加密排烟窗与小型机械排烟风口,在凸起迎风区域严控开窗数量,利用风压互补效应破解烟气滞留难题;同时定制弧形适配型排烟设备,贴合非线性外立面造型,避免设备突兀破坏建筑美学。多层中庭空间层面,采用“顶部天窗排烟+中层辅助排烟”双层体系,中庭顶部配置大尺寸智能排烟天窗,负责排出上层高温烟气;竖向楼层夹层增设环形排烟风口,及时拦截中层窜层烟气,抑制烟囱负面效应。下沉式内院空间增设移动式备用排烟机组,火情初期快速介入,弥补自然排烟效率不足的短板,全方位覆盖所有排烟盲区。

(二) 立体化疏散扶梯与流线重构

结合异形空间拥堵死区分布规律,重构立体化双向疏散体系,优化疏散扶梯与应急通道布局。首先,拆除异形通道狭窄分叉节点处多余景观设施、闲置隔断构件,拓宽拥堵节点通行宽度,统一主疏散通道净宽度不低于 1.4m,满足高峰期双向通行需求;其次,调整自动扶梯布设位置,避开中庭烟气直落区域,将单向扶梯升级为可双向切换模式,火灾工况下统一切换为疏散下行模式,辅助人员快速撤离高层区域;最后,优化应急疏散导向系统,依托 BIM 仿真人流拥堵数据,在流线分叉位置、曲面盲区增设动态智能导向标识,根据火情实时变更逃生指引路线,引导人群规避高风险烟气区域与拥堵节点,降低疏散流线交叉干扰,提升整体疏散效率。

(三) 动态防火卷帘与分区边界优化

为解决多层中庭、异形空间防火分区划分难、卷帘适配性差的问题,推行柔性动态防火分区模式,优化防火卷帘布设方案。多层贯通中庭摒弃固定式硬性分

区模式，在中庭竖向开口、楼层连通回廊处布设异形定制防火卷帘，卷帘尺寸、弧度适配曲面建筑外立面，常态下完全收纳隐藏，保持空间通透属性；火灾工况下根据起火位置分区降落，仅隔离起火区域及相邻高危区域，而非全域封闭，平衡防火隔离与空间使用属性。碎片化异形空间依托 BIM 模型划分精细化亚防火单元，在不规则空间边界布设折叠式防火卷帘，替代传统平直防火墙，适配非线性空间形态；同时联动火情预警系统，实现卷帘自动精准降落，从空间层面阻断火势与烟气扩散，补齐复杂形态建筑被动防火短板。

大跨度曲面、多层中庭、异形复合类复杂形态建筑的消防防控难点，根植于非线性空间结构、竖向贯通格局与立体化人流流线，集中表现为烟气堆积无序、竖向窜火迅猛、疏散流线交叉拥堵三大问题。通过搭建 BIM 火灾动力学耦合仿真体系，复刻复杂建筑实景空间并开展多工况烟气推演，精准定位排烟盲区与疏散薄弱节点；以此为依据优化分层适配排烟系统、重构立体化应急疏散流线、布设柔性动态防火卷帘，形成适配异形空间的一体化消防优化方案。该策略打破传统标准化消防设计思维的局限性，能够在保护复杂建筑造型美学与空间体验的基础上，系统性提升烟气控制能力与人员疏散安全冗余，为非线性大型公共建筑消防设计提供标准化、可落地的技术范式。

第六章 BIM 与土木工程融合：结构防火与消防韧性设计

第一节 基于 BIM 的结构抗火分析与构件性能模拟

在高层建筑、大跨度公共建筑、复合型综合体等现代化土木工程建设项目中，结构抗火性能直接决定建筑火灾耐受能力与整体消防韧性，也是被动防火设计体系中最核心的底层支撑内容。依托 BIM 数字化平台，搭建覆盖多类主材的热工与力学一体化数据库，联动专业化有限元分析软件，实现火灾全周期温度场、应力场耦合仿真，精准研判承重构件形变规律与承载力衰减特征，并以此为依据迭代优化构件截面形制与防火保护层参数，能够从数字化定量层面完善结构抗火设计流程，全方位提升现代土木工程结构的火灾抵御能力与灾后容错能力。

一、基于 BIM 的结构构件热工数据库搭建与参数录入

数字化参数数据库是 BIM 技术赋能结构抗火模拟、性能校核与方案优化的基础载体，相较于常规建筑建模仅收录几何尺寸、空间坐标、构件材质等浅层基础信息，结构抗火专用数据库需要结合火灾热力学仿真、结构力学耦合分析的双重需求，整合几何属性、基础材质属性、高低温热工属性、全阶段力学属性、分级耐火属性五大维度数据体系。

（一）构件基础几何与材质分类入库

数据库搭建前期需要完成全结构构件拆分、精细化建模与分类入库作业，以建筑结构受力传递逻辑为划分依据，建立标准化构件分类体系，规范建模细则与入库标准，从源头提升数据库的有序性与复用性。从空间受力维度进行划分，可将所有承重构件划分为竖向承重体系与水平承重体系两大板块，竖向承重构件囊括矩形框架柱、异形截面柱、现浇剪力墙、装配式承重墙板、钢结构核心筒、斜向承重支撑柱等细分构件，主要承担竖向荷载并抵御侧向附加荷载；水平承重构件包含现浇钢筋混凝土主梁、次梁、装配式叠合梁、单向双向楼板、大跨度悬挑

梁板、空间桁架、钢网架结构等，主要负责分散竖向荷载、平衡结构内部应力。从制作材质维度进行划分，可细化为普通硅酸盐钢筋混凝土构件、高性能纤维混凝土构件、自密实混凝土构件、热轧碳素钢构件、低合金高强钢构件、轻钢复合构件、一体化钢混组合构件七大类别，全面覆盖现阶段土木工程主流结构主材。在 BIM 建模作业过程中，摒弃行业内粗放式简化建模的通病，严格依照施工图纸、结构设计总说明、节点详图完成 1:1 精细化建模，完整还原构件截面轮廓、截面长宽、构件总长、端部连接形式、节点锚固构造、空间排布坐标等几何参数；同时同步录入骨料粒径、混凝土水胶比、钢筋牌号、配筋间距、钢材冶炼工艺、合金元素占比等基础材质参数，实现几何信息与材质信息双向绑定，为后续差异化热工参数配置奠定基础。

（二）核心热工性能参数标准化录入

热工性能参数是表征建筑构件在火灾高温环境下热量蓄积、热量传导、热形变响应的核心指标，也是有限元热传导仿真、全域温度场计算的核心输入条件。不同于常温工况下的固定参数模式，火灾高温区间内各类建筑主材热工参数均呈现显著非线性变化特征，温度梯度越高，参数波动幅度越大，若直接采用常温固定参数进行仿真计算，会造成温度场模拟偏差，直接降低抗火分析结果的有效性。针对钢筋混凝土类构件，数据库主要录入动态导热系数、分级比热容、线性及非线性热膨胀系数、内部水分蒸发潜热、内部孔隙率、骨料热阻系数六大核心参数，温度采集区间设定为 20℃—1200℃，以 100℃为梯度节点逐一录入对应数值，重点兼顾高温状态下混凝土内部自由水蒸发、结合水析出、骨料热胀冷缩、水泥砂浆碳化等物理化学反应带来的参数波动；针对钢结构类构件，统一录入高温导热系数、质量比热容、线性热膨胀系数、表面热辐射发射率、高温氧化系数五类参数，钢材热工参数非线性特征弱于混凝土材料，但温度超过 600℃后钢材金相组织会发生质变，热传导效率大幅提升，因此需要单独增设 600℃—1200℃高阶温度区间的专属参数；针对应用范围日益广泛的钢混组合构件，采用分层独立录入模式，分别定义外部混凝土保护层、内部受力钢筋、钢筋与混凝土黏结界面三层结构的差异化热工参数，额外增设界面接触热阻参数，精准还原火灾工况下多层复合构件的热量传递规律，最大化缩小仿真数据与实体火灾试验数据的偏差。

（三）耐火与力学联动属性补充完善

单纯的热工参数仅能够支撑构件温度场分布模拟，仅可判断构件表层与内部

温度分布情况，无法推演高温环境下构件承载力衰减、结构形变、界面开裂、整体失稳等力学失效问题。为实现温度场与应力场双向耦合仿真，需要在现有数据库基础上补充耐火专项属性与高温力学联动属性，构建“几何－材质－热工－耐火－力学”五位一体的综合性抗火参数数据库。在耐火属性层面，严格参照《建筑构件耐火试验方法》（GB/T 9978）相关规范要求，录入不同保护层厚度、不同受火形式下构件的基准耐火极限、临界失效温度、极限耐受灼烧时长、防火等级适配范围等数据，同时划分单面受火、双面受火、环向受火三种工况对应的差异化耐火阈值；在高温力学属性层面，系统收录混凝土高温抗压强度、抗拉强度衰减曲线、钢材屈服强度折减系数、弹性模量温度修正系数、钢混界面黏结强度退化公式、箍筋约束效应参数等核心数据；在损伤预警层面，明确构件极限挠度、轴向形变临界值、抗剪承载力失效红线、结构局部屈曲预警阈值、整体失稳判定标准等预警参数。所有联动参数与构件热工数据深度绑定，可一键同步共享至各类有限元分析端口，彻底打破传统仿真模式单一温度模拟的技术局限性，实现热－力耦合一体化分析。

二、BIM 与有限元耦合下构件高温性能全过程模拟

在完成一体化抗火参数数据库搭建、构件精细化建模入库之后，依托通用数据交互接口与二次开发插件，打通 BIM 建模平台与 ANSYS、ABAQUS、PyroSim 等主流有限元分析软件的数据传输壁垒，构建一套标准化、可复用、全闭环的耦合仿真作业流程。该流程以 BIM 模型为数据中枢，依次完成模型预处理、参数同步赋值、多工况温度场仿真、热力耦合计算、数据逆向回传五大环节，能够完整复刻建筑火灾快速升温、高温稳态灼烧、灾后自然降温三大完整阶段，全方位还原承重构件热量渗透、热胀形变、承载力劣化、界面损伤、局部失效的动态演化全过程，为结构抗火性能校核与优化设计提供量化、精准、直观的数据支撑。

（一）数据接口适配与仿真前置预处理

BIM 结构模型与有限元分析模型分属两套独立的建模逻辑与数据格式，原生状态下存在格式不兼容、复杂构件识别错乱、精细化参数丢失、网格划分难度大等行业共性问题，也是制约数字化抗火仿真普及的主要瓶颈。为有效解决上述问题，本次研究采用“中间格式转化＋专用插件适配＋模型轻量化预处理”的复合型解决方案。首先，在 Revit 结构 BIM 模型中完成构件筛选作业，批量剔除装

饰面层、临时支撑构件、预埋附属配件、小型预埋件等与结构抗火仿真无关的无效模型元素，仅保留竖向承重、水平承重核心结构体系；其次，将筛选完成后的纯净模型导出 IFC 国际通用中间格式文件，规避专用格式无法跨平台传输的问题；随后调用二次开发专用转化插件，对模型进行网格剖分优化，针对异形截面梁柱、曲面楼板、空间桁架等复杂构件进行精细化四边形网格划分，同时简化微小倒角、毫米级凹槽、冗余拼接节点等对仿真结果无实质性影响的细碎构造，在保障仿真精度满足学术与工程要求的前提下，降低网格单元总数，提升软件运算效率；最后在有限元软件内部完成模型重构与参数赋值，系统自动读取 BIM 数据库内绑定的全套热工与力学参数，并按照构件材质、受力等级、受火区域完成批量赋值，同步预设 ISO834 国际标准火灾升温曲线、外部明火辐射强度、构件表面换热系数、环境对流系数等外部约束条件，完成仿真作业全部前置准备工作。

（二）多阶段温度场分布仿真计算

结合民用建筑、工业建筑火灾发展的客观规律，结合起火诱因、可燃物荷载、空间通风条件，将整体火灾仿真周期划分为快速升温阶段、高温恒定灼烧阶段、灾后自然降温阶段三个独立阶段，分阶段开展全域截面温度场仿真计算，全面研判不同时期构件温度分布与隔热防护效果。快速升温阶段以 ISO834 标准升温曲线为基准，模拟起火后 0—180min 常规火灾发展周期，实时监测构件外表面、保护层内侧、基材表层、构件中心截面四个层级的温度变化规律，量化分析不同厚度防火保护层、不同材质基材的隔热滞后效应，甄别短时间高温冲击下的隔热薄弱截面；高温恒定阶段将环境温度稳定维持在 850℃—1000℃区间，模拟大型公共建筑可燃物充足、火势稳定蔓延的极端工况，持续测算外部高温向构件内部渗透的速率，对比分析混凝土与钢材两类主材的耐高温差异，探究保护层老化、开裂、脱落对基材温度的直接影响；自然降温阶段切断外部明火热源，关闭主动排烟与灭火设备，模拟火灾扑灭后建筑密闭空间内部余热消散的全过程，统计构件内部残余温度分布特征，分析高温残余应力对构件后期服役性能的隐性损伤。仿真作业结束后，批量输出构件截面温度云图、时序温度变化报表、横向与纵向等温分布曲线、高温覆盖范围数据，精准定位全结构高温聚集区域与防护短板构件。

（三）热力耦合下形变与承载力衰减分析

以多阶段温度场仿真输出的时序温度数据为基础，启动热力耦合求解器，开展双向热力耦合计算，从形变特征、承载性能、界面损伤三个维度，全方位剖析

高温环境下各类承重构件的失效演化机理，实现由单一温度模拟向综合性结构性性能评估的升级。在形变特征层面，结合构件热膨胀系数与截面实时温度数据，精准测算构件轴向伸缩量、侧向挠度偏移值、截面扭曲角度、端部转角等形变参数，重点观测大跨度悬挑梁板、超高长细比框架柱、薄壁钢结构桁架等易屈曲构件的热变形规律，明确局部形变超限的时间节点与空间位置；在承载性能层面，依托高温力学折减系数动态更新构件抗压、抗弯、抗剪、抗屈曲四大核心承载力数值，绘制全周期承载力时序衰减曲线，划分正常服役、性能轻度劣化、性能重度衰减、临界失效、完全破坏五个性能等级；在界面损伤层面，专门针对钢混组合构件，分析高温作用下混凝土表层碳化、保护层开裂脱落、内部钢筋锈蚀、钢筋与混凝土黏结界面剥离等病害问题，评估复合构件协同受力体系的破损规律。上述三类仿真数据互为补充，能够完整界定高危构件的失效阈值，为后续结构优化提供充足的数据支撑。

三、基于仿真数据的结构抗火性能优化设计

依托 BIM- 有限元耦合仿真输出的温度云图、形变数据、承载力衰减报表、界面损伤分布数据，可精准定位结构体系隔热薄弱点位、高危失效构件、传力体系短板。以此量化数据为优化依据，摒弃传统结构抗火设计盲目加大截面、全域加厚保护层的粗放式保守设计模式，从承重构件截面形制优化、防火保护层分级调控、整体结构冗余传力体系升级三个层面，制定差异化、精细化、低成本的优化方案，平衡结构消防安全、工程建设成本、室内空间利用率、后期运维难度四大要素，系统性提升土木工程单体构件耐火性能与整体结构抗坍塌冗余度。

（一）承重构件截面尺寸精细化优化

传统经验化抗火设计模式下，设计人员为规避高温坍塌安全风险，普遍采用统一放大构件截面尺寸、提高配筋率的保守设计手段，该方式虽然能够满足基础防火规范要求，但极易造成建材资源浪费、结构自重激增、室内使用空间被挤占、基础造价上浮等一系列衍生问题。基于仿真数据推行差异化截面优化策略，对全结构构件进行分级优化，实现安全性能与经济效益双向平衡。针对仿真结果显示耐火冗余度富余、承载力衰减幅度极小的常规低层竖向构件与短跨水平构件，适度缩小截面长宽尺寸，优化内部配筋排布方式，删减冗余受力钢筋，在保障耐火性能与力学性能达标的前提下，降低结构整体自重，削减混凝土、钢筋主材消耗量；

针对高温工况下侧向挠度超标、抗屈曲能力薄弱、承载力衰减过快的高危构件，摒弃传统矩形截面设计，优化为箱型截面、工字型截面、双轴对称异形截面等高效受力截面，通过优化截面惯性矩分布提升构件高温抗形变能力，无需额外增加建材用量即可完成性能升级；针对大跨度悬挑结构、超高长细比承重柱、空间异形桁架等特殊构件，结合多温度、多升温时长工况的仿真结果，制定专属截面优化方案，规避单一工况优化带来的设计片面性，全面强化特殊构件的防火适配能力。

（二）防火保护层厚度分级调控设计

防火保护层作为阻隔外部高温、延缓基材温度上升速率、延长构件耐火极限的被动防护构造，其厚度、材质、施工工艺直接决定承重构件火灾耐受时长，是结构防火优化设计中性价比最高、落地难度最低的优化要素。结合构件所处空间火灾风险等级、受热形式、仿真温度峰值数据，推行区域分级、构件分类、受热面分档的三级保护层管控模式，替代全域统一厚度的粗放式管控方案。按照空间区位划分高危、常规、低危三大区域：厨房、燃气设备机房、地下密闭车库、物资仓储房间等高危区域，可燃物荷载大、起火概率高、火情蔓延速度快，对区域内梁柱、支撑构件适度加厚防火保护层，延长热量渗透时长；普通办公区域、公共休憩区域、走廊通道等常规区域，严格按照国家规范最低阈值配置保护层厚度，在满足消防安全底线的基础上控制改造成本；屋面附属支撑构件、室外裸露钢结构、半开放式廊道构件等低危区域，简化保护层构造，选用经济型轻量化防护材料，降低后期运维翻新成本。与此同时，依据构件受热面数量，区分单面受火、双面受火、环向全包围受火三种工况，针对环向受火钢柱、核心筒竖向构件，采用非对称厚度设计，在明火直面侧、迎风高温侧加厚防护层，最大化提升防护资源利用效率。

（三）整体结构抗火冗余体系整合升级

对单一构件的截面与保护层优化仅能提升单体构件耐火性能，无法从根源上解决火灾工况下局部构件失效引发的连锁坍塌灾害，想要提升建筑整体消防韧性，必须依托全结构仿真数据，统筹升级整体结构抗火冗余体系，完善备用传力路径与分区防护机制。第一，优化整体结构传力路径，重新配比主次梁受力分配系数，在高危区域增设可拆卸防火备用支撑构件，搭建多路径冗余传力体系；当局部高危构件在高温作用下失效退出受力体系时，备用支撑构件可快速承接上部荷载，阻断连锁坍塌风险。第二，优化结构防火亚单元划分，结合整体温度仿真云图，

以防火墙、防火卷帘、高耐火梁柱为边界，将大型结构拆分为若干小型防火亚单元，提升火情隔离能力，防止局部火情衍生为全域结构性火灾。第三，搭建数字化结构预警体系，将优化后构件的形变阈值、承载力失效红线、温度临界值录入 BIM 运维管理平台，设置预警、告警、紧急处置三级预警机制，火灾发生时实时监测结构性能变化，为人员疏散、消防救援、灾后修复提供数据参考，全方位强化土木工程结构综合消防韧性。

以 BIM 数字化数据库为核心载体，整合主流承重构件几何形态、基础材质、高温热工、力学响应、分级耐火五大维度参数，能够有效破解传统结构抗火设计参数碎片化、工况适配性差、数据无法共享的行业痛点；通过打通 BIM 建模平台与有限元仿真软件的数据传输链路，实现火灾三阶段温度场与应力场双向热力耦合仿真，完整复现构件高温形变、承载力衰减、界面剥离损伤的动态演化规律，精准定位全结构抗火薄弱区域与高危构件。依托量化仿真数据，从构件截面形制精细化优化、防火保护层分级差异化调控、整体冗余传力体系整合升级三个层面完成系统性优化，打破传统经验化保守设计桎梏，在严控工程建设成本、保障室内空间完整度的前提下，提升单体构件耐火极限与整体结构抗坍塌冗余。该数字化抗火分析模式重构土木工程结构防火设计底层逻辑，推动结构抗火设计由传统定性经验分析转向现代定量数据优化，为超高层建筑、大跨度公共建筑、复合型工业建筑的韧性化结构防火设计提供标准化、可落地的技术范式。

第二节 钢筋混凝土及钢结构防火保护的数字化建模

防火保护构造是现代土木工程被动防火体系的重要组成部分，也是提升钢筋混凝土与钢结构承重构件耐火性能、延缓基材高温劣化、延长建筑整体耐火时长、降低火灾灾害损失与灾后修复成本的核心配套技术。现阶段国内工程领域应用最为成熟、覆盖面最广的防护构造主要分为防火涂料喷涂、预制防火板模块化包覆、外包耐火混凝土整体浇筑三类，三类防护构造施工工艺、防护机理、适配构件、适用场景差异显著。依托 BIM 分层精细化建模技术，针对三类主流防火保护构造搭建分层几何模型，并完善耐火极限、施工工艺、材料造价、服役年限等全维度信息属性，借助模型自带工程量统计功能自动分类核算材料用量，打通数字化设计、可视化交底、精准化施工、全周期成本管控一体化链路，全面推动结构防

火保护工程向数字化、精细化、工业化方向转型升级。

一、结构防火保护类型划分与数字化建模底层逻辑

数字化建模并非简单复刻防护层外观轮廓的浅层建模作业，而是结合各类防护构造的分层施工逻辑、材料理化特性、节点构造形式、验收规范标准，搭建几何结构完整、信息属性齐全、施工指导能力完备的复合型信息化 BIM 模型。模型同时兼顾方案设计可视化、施工现场可交底、工程量自动计量、运维数据可追溯四大核心功能，适配设计单位、施工单位、造价单位、运维单位多方主体使用需求，为结构防火保护专项工程全流程提供数字化支撑。

（一）主流防火保护构造防护机理与适配场景

结合防护材质与施工工艺，可将现阶段主流结构防火保护构造划分为防火涂料、预制防火板、外包耐火混凝土三大类别，不同类别下细分产品的防护机理、服役特征、适配构件与应用场景具备明确差异化特征。防火涂料包含膨胀型防火涂料与非膨胀型无机防火涂料两类，也是目前普及率最高的轻量化防护手段，整体施工便捷性强，能够适配异形截面梁柱、曲面钢结构、复杂拼接节点、小型附属承重构件等造型复杂的结构部位。其中膨胀型防火涂料常态下涂层厚度控制在 2mm—7mm 之间，整体占用空间极小，不会破坏建筑外立面美学造型与室内空间布局；高温火灾环境下涂层内部化学组分快速发生吸热反应，发泡膨胀形成 50mm—150mm 厚度的多孔碳化隔热层，依托碳化层低导热属性阻隔外部高温，主要适配室内干燥环境中小型钢结构构件、常规混凝土梁板构件。非膨胀型防火涂料以硅酸盐水泥、无机矿物骨料、防火阻燃填料为主要原料，依靠材料自身低热传导系数实现被动隔热防护，涂层成型后结构稳定性强、抗老化性能优异、耐潮湿腐蚀能力突出，耐火时长上限远高于膨胀型涂料，多用于高层建筑核心承重钢构件、地下高湿密闭空间、工业厂房腐蚀性区域的钢混构件。预制防火板以改性硅酸盐防火板材、岩棉复合防火板材、玻璃棉阻燃板材为核心产品，采用结构胶黏结、金属卡扣固定、预埋螺栓锚固三种拼装方式完成构件包覆作业，防护层成型厚度均匀、外立面平整度高、工业化预制程度高，施工过程无粉尘污染，适合对室内装饰美观度、施工环保性有较高要求的公共建筑外露承重构件。外包耐火混凝土保护构造采用高耐火等级特种混凝土整体浇筑成型，防护层整体性最强、抗高温冲击能力、抗机械撞击能力远超涂料与防火板材，同时可同步实现结构加

固与防火防护双重功能，但自重增量较大，一般仅用于超高承重框架柱、重型工业厂房钢混组合构件、大型设备支撑柱等核心受力构件。

（二）差异化分层建模基础原则

基于三类防火保护构造分层结构、施工工艺、成型形态的差异化特征，统一制定分层复刻、属性绑定、工艺适配、边界对齐四大标准化数字化建模原则，规范 BIM 建模细则，规避模型错乱、属性缺失、构造失真等问题。分层复刻原则明确所有防护构造模型禁止采用单层粗放建模模式，必须严格按照真实施工顺序，由内至外依次建立承重基材层、界面黏结过渡层、核心防火防护层、外表面装饰保护层四层独立子模型，完整还原实体工程分层构造；属性绑定原则要求每一层子模型均需绑定专属信息属性，涵盖材料名称、生产规格、阻燃添加剂占比、标准施工厚度、极限耐火时长、原材料单价、全生命周期运维成本、规范验收标准八大基础属性；工艺适配原则根据不同施工工艺微调建模细节，喷涂类防火涂料简化微观凹凸肌理，统一采用平均成型厚度建模，忽略毫米级喷涂误差；预制防火板材完整还原板材规格、拼接缝隙、卡扣锚固节点、封边处理构造；外包混凝土还原施工缝、浇筑分层、模板锚固点位等施工细节；边界对齐原则规定防护层模型必须以承重构件基材截面为基准，统一坐标原点与边界范围，杜绝模型重叠、边界空缺、构件错位、厚度偏移等建模错误，保障模型与实体工程一一对应。

（三）多类型模型统一建模流程

为降低建模难度、提升模型复用率，针对三类防火保护构造制定统一标准化建模流程，分为基底预处理、分层模型创建、属性批量赋值、节点深化优化、模型校验归档五大固定步骤。第一步，基底预处理，调取已完成的结构承重构件基础 BIM 模型，清理构件多余附属构件，统一构件坐标系与截面边界，以此作为防火防护层建模基底；第二步，分层模型创建，依据分层建模原则，分别创建粘结层、防护层、装饰保护层子模型，根据防护类型设定初始厚度参数；第三步，属性批量赋值，调用内置防火材料属性数据库，批量为分层子模型匹配对应的材料参数、造价参数、耐火参数，实现一键赋值；第四步，节点深化优化，针对梁柱交接、柱板交接、节点拼接等复杂部位，单独深化防护节点模型，补齐转角、端部、缝隙处防护构造，消除防护盲区；第五步，模型校验归档，开展碰撞检测、厚度校验、边界校验双重检测，排查建模错误，校验合格后归档至防火构件专属族库，方便后续同类型项目直接调取复用，大幅缩短建模周期。

二、多类型防火防护构造精细化分层建模实现

结合防火涂料、预制防火板、外包耐火混凝土三类防护构造的施工特点与分层结构,依托 Revit 平台族编辑器与系统建模工具,分别开展精细化分层建模作业,针对不同构造的薄弱节点、成型特征、施工难点进行专项深化设计。同时严格遵循前文制定的建模原则与标准化作业流程,区分钢结构与钢筋混凝土构件的防护建模差异,细化边角、拼接缝、端部封边等隐蔽节点构造,让 BIM 模型既可以满足设计方案可视化展示需求,也能够直接用于施工现场三维技术交底,解决二维图纸表达模糊、节点理解偏差等施工通病。

(一) 防火涂料分层精细化建模

防火涂料防护体系整体分为三层结构,由内至外分别为界面粘结底漆层、主防火涂料功能层、外表面耐候装饰面漆层,建模过程中需分别对三层结构进行独立创建与参数赋值。底漆黏结层作为过渡结构,主要作用是提升涂料与基材的粘结强度,防止后期涂层开裂脱落,标准施工厚度控制在 0.3mm—0.5mm,建模时均匀覆盖构件所有受火表面,重点补齐构件转角、阴阳角等易脱落部位;主防火功能层是核心防护结构,根据涂料类型差异化设定厚度参数,膨胀型涂料常规厚度 2mm—7mm,多用于室内干燥环境钢构件,非膨胀型无机涂料厚度 10mm—30mm,适配高湿、高危工况下的钢混承重构件;外表面面漆层主要用于防护涂料本体、提升外立面美观度、增强耐候抗腐蚀能力,厚度统一设定 0.2mm—0.4mm。针对梁柱交接、主次梁节点等复杂区域,摒弃传统整体平铺建模模式,采用分区包覆建模,单独优化节点转角处涂料填充构造,规避节点漏涂、薄涂等隐患。同时在属性板块录入涂料燃烧等级、产烟等级、适配基材、施工喷涂遍数、养护周期、材料综合单价等详细参数,完善信息模型数据体系。

(二) 预制防火板模块化拼装建模

预制防火板采用工厂预制、现场拼装的工业化施工模式,整体防护体系包含基材找平层、专用结构胶黏结层、防火板材主体层、金属固定配件、密封封堵层五大组成部分,建模核心重点为标准化板材拼装节点与固定配件布局。基底处理阶段,对钢构件外露表层、混凝土构件破损位置进行找平建模,消除凸起与凹陷缺陷;黏结层采用专用防火结构胶,厚度统一设定 2mm—3mm,全覆盖板材与基材接触界面;防火板材按照市场通用规格创建标准化族文件,常规板材尺寸分为 1220mm×2440mm、600mm×1200mm 两类,厚度根据耐火等级需求选取

15mm、20mm、25mm、30mm 四种规格；固定配件包含镀锌自攻螺丝、不锈钢卡扣、L 型封边角钢，建模时依照 500mm 间距均匀排布，模拟真实拼装固定工艺；最后在板材拼接缝隙、阴阳角交接缝隙处建立防火密封胶封堵层，彻底封堵烟气渗透通道。相较于涂料模型，防火板材模型需额外录入板材单块规格、拼装排布间距、配件型号、拼装损耗率等专属参数，适配后续工程量分项统计作业。

（三）外包耐火混凝土整体浇筑建模

外包耐火混凝土防护构造整体性最强，多用于重型承重构件，分层结构主要涵盖基层凿毛处理层、钢筋网加固层、外包耐火混凝土防护层三大层级，建模作业侧重浇筑分层、施工缝设置与配筋构造还原。基层处理层主要针对原有钢筋混凝土构件表面凿毛、钢结构构件除锈防腐处理，建模以示意模型为主，用于施工交底；钢筋网加固层布设在外包混凝土内部，距离外表面 20mm 保护层位置，采用双向钢筋网片，钢筋直径选取 4mm—6mm，网格间距 100mm×100mm，主要作用是提升混凝土抗开裂能力；外包耐火混凝土为核心防护层，根据构件火灾风险等级设定厚度，常规承重柱防护厚度 50mm—80mm，高危区域核心柱厚度提升至 100mm—150mm。建模过程中严格还原分段浇筑施工缝、端部封堵构造、模板支撑点位，同时录入特种混凝土配合比、骨料类型、2h/3h 耐火极限对应厚度、浇筑养护周期、综合造价等属性参数，兼顾结构防护设计与施工指导双重价值。

三、防火保护构件信息属性赋值与工程量数字化统计

精细化分层几何模型仅能解决可视化设计与三维交底问题，想要实现数字化全流程管控，必须依托完善的信息属性体系与自动化工程量统计功能。在分层模型基础上，为不同防护构造、不同分层构件附加耐火性能、施工工艺、材料造价、服役周期、报废回收五大类专属属性，并依托 BIM 模型参数联动特性，设置自动化工程量统计表单，分别统计粘结材料、防火主材、固定配件、装饰面层的分项工程量，为防火保护专项工程方案比选、施工预算编制、材料采购计划、竣工结算审计提供精准的数据支撑。

（一）全维度防护信息属性分类赋值

结合三类防火保护构造的工程应用需求，搭建五大类专属信息属性板块，完成精细化分类赋值，实现一物一属性、一层一参数。第一类为耐火性能属性，包含材料燃烧等级、产烟毒性等级、对应防护厚度下构件整体耐火极限、极限耐受

温度、老化衰减周期，是方案设计与消防报审的核心依据；第二类为施工工艺属性，涵盖标准施工工序、喷涂 / 拼装 / 浇筑施工参数、养护周期、基层处理要求、验收规范条文编号，直接用于施工现场三维技术交底；第三类为造价经济属性，录入原材料单价、施工综合单价、材料损耗率、单位面积造价、全生命周期运维成本，服务于造价预算编制；第四类为适配属性，明确防护构造适配基材、适配空间环境、最优应用场景、禁止使用工况，方便设计人员快速完成方案选型；第五类为运维报废属性，包含设计服役年限、老化检测周期、破损修复方案、报废回收方式、建筑垃圾产生量，为后期建筑运维与拆除阶段提供数据参考。所有属性参数均可实时编辑、动态更新，同步联动工程量统计数据。

（二）BIM 模型工程量统计规则设定

为解决传统人工算量误差大、效率低、易漏项、更新滞后等痛点，依托 BIM 平台自带明细表功能，制定分项工程量统计规则，针对不同防护构造设定差异化计量指标。防火涂料类构造以表面积为核心计量单位，分别统计底漆、功能层、面漆的包覆面积，结合平均厚度自动换算涂料体积用量，同步统计阴阳角附加涂料用量；预制防火板类构造以面积与配件数量双重指标计量，统计防火板材有效铺装面积、密封胶长度、固定卡扣与螺丝数量、封边角钢长度；外包耐火混凝土类构造以体积为计量单位，自动核算不同区域防护层混凝土体积、加固钢筋网片重量。同时设置分类筛选规则，可按照构件类型、楼层区位、防火等级、防护类型进行筛选统计，支持分项导出 Excel 标准化报表，适配造价软件直接导入使用。

（三）工程量数据应用与动态更新机制

依托自动化统计功能输出的工程量报表，可全方位支撑防火保护工程全流程业务应用。设计阶段，设计人员结合不同防护方案的工程量与造价数据，开展多方案经济性对比，在满足耐火等级规范要求的前提下，筛选性价比最优的防护构造；施工阶段，施工单位根据分项工程量报表制定材料采购计划、分配施工班组、编排施工进度计划，减少材料盲目采购造成的资源浪费；造价阶段，造价人员依托精准模型工程量完成预算编制、进度款核算、竣工结算审计，规避人工算量偏差引发的造价纠纷；运维阶段，管理人员根据防护层面积、服役年限，制定分区域翻新养护计划。同时模型建立参数联动动态更新机制，防护厚度、材料规格、包覆范围任意参数发生改动，明细表数据会实时同步更新，保障数据始终与设计方保持一致，实现设计、算量、施工一体化协同。

防火涂料、预制防火板、外包耐火混凝土三类防护构造在防护机理、施工工艺、适配场景层面各有优劣，针对钢筋混凝土与钢结构构件开展差异化分层 BIM 建模，能够完整还原防护构造分层结构、隐蔽节点与施工细节，解决二维图纸表达局限性问题。通过为分层子模型附加耐火性能、施工工艺、造价成本、运维周期等全维度信息属性，将纯几何模型升级为信息化复合型模型；依托定制化计量规则自动统计各类防火材料分项工程量，实现防火保护设计可视化、施工交底具象化、造价计量精准化、运维管理数字化。该数字化建模与算量体系补齐了传统防火保护工程的技术短板，有效降低设计偏差、施工误差与计量误差，既能够提升结构防火保护施工质量，也可以压缩项目造价成本与施工周期，为土木工程结构防火保护工程数字化转型提供完整、成熟、可直接落地的技术实施体系。

第三节 土木工程视角下的消防荷载与结构冗余

常规土木工程结构设计仅考量恒荷载、活荷载、风荷载、地震荷载等常态化工况荷载，普遍忽视火灾特殊工况下衍生的复合型消防荷载，这也是多数建筑火灾出现局部坍塌、救援伤亡事故的核心设计短板。从土木工程结构力学角度分析，火灾并非单一高温作用，而是涵盖高温热荷载、消防积水静动荷载、喷淋射流冲击荷载、烟气负压荷载的多重复合极端工况。为提升建筑消防韧性，需明确各类消防荷载的力学机理与量化取值标准，在结构计算模型中同步叠加多类型消防组合荷载，校核疏散阶段与救援阶段结构稳定性，并通过增设冗余承重构件、优化荷载传递路径、完善备用受力体系等方式，提升结构抗灾冗余储备，保障火灾疏散、消防救援及灾后降温全过程建筑主体结构安全。

一、土木工程领域消防荷载类别与量化取值标准

消防荷载属于极端偶然类特殊荷载，区别于规范明文规定的常规结构荷载，现阶段国内《建筑结构荷载规范》尚未形成统一、完整的消防荷载计算体系，多数设计人员在结构建模计算中直接忽略该类荷载，造成极端火灾工况下结构安全储备不足。结合火灾灾害演化规律与消防作业流程，可将消防荷载划分为高温热荷载、消防积水荷载、喷淋射流冲击荷载三大核心类别，各类荷载作用机理、作用位置、作用时长、力学表现存在明显差异，需要结合构件材质、空间业态、火

灾等级制定标准化取值与计算方法。

（一）高温热荷载作用机理与取值规范

高温热荷载是火灾工况下最基础、危害程度最高的原生型消防荷载，本质是构件受温变影响产生热胀变形，受结构边界约束后衍生出附加温度应力与形变位移，间接改变结构内力分布状态。在密闭建筑空间内部，明火持续灼烧会造成承重构件内外截面形成温度梯度，表层材料急速膨胀、内部基材形变滞后，进而产生压应力与拉应力；同时不同材质构件热膨胀系数差异较大，钢构件高温形变幅度远大于混凝土构件，钢混组合节点易出现挤压、剥离、开裂等结构性病害。从荷载取值层面而言，高温热荷载无法直接以集中荷载、均布荷载形式施加，需依托温度场数值进行间接换算。结合 ISO834 标准升温曲线，可将建筑火灾划分为轻度、中度、重度三个等级。

（二）消防积水静动荷载计算标准

消防积水荷载主要来源于自动喷淋系统持续喷水、消防水枪灭火喷射、室内可燃物燃烧裂解水分、灾后残余积水，分为静态积水荷载与动态积水荷载两类，是高层建筑楼板、次梁坍塌的重要诱因。静态积水荷载以浅层静水压力为主，积水大面积覆盖楼板表层，转化为均布面荷载作用于水平承重构件；动态积水荷载产生于消防强力喷射作业，水流冲击楼板、悬挑构件、吊顶结构，形成瞬时脉冲集中荷载。多数结构设计人员默认积水荷载属于临时性低等级荷载，仅采用固定面荷载取值，未结合积水深度、空间排水条件动态核算，极易造成承载力校核失效。结合不同建筑功能空间排水能力、可燃物燃烧耗水量、消防作业用水量，汇总标准化取值参数，以此规范积水荷载设计取值，下表为不同火灾工况下消防积水荷载参考取值。

火灾工况等级	平均积水深度 (mm)	静态面荷载 (kN/ m ²)	动态冲击荷载 (kN)	适用建筑空间
轻度火灾工况	10~25	0.15~0.25	0.5~1.0	办公用房、开放式走廊、 闲置附属房间
中度火灾工况	25~50	0.25~0.50	1.0~2.5	商业商铺、展厅、普通 物资仓储区
重度火灾工况	50~100	0.50~1.00	2.5~5.0	餐饮后厨、地下车库、 密闭设备机房
极端救援工况	> 100	> 1.00	5.0~8.0	消防员定点灭火核心起 火区域

（三）喷淋射流冲击荷载适配取值

自动喷淋系统是建筑主动防火体系的核心组成部分，火灾触发后喷淋喷头持续喷射高压水流，水流坠落至楼板、吊顶、轻型隔墙、悬挑装饰构件表面，形成持续性冲击荷载与附加振动荷载。相较于消防积水荷载，喷淋冲击荷载作用范围更广、作用周期更长，且具备周期性波动特征，对轻钢结构、装配式预制楼板、老旧加固构件危害最为显著。从荷载计算逻辑分析，喷淋冲击荷载大小由喷头出水压力、喷射流量、喷射角度、水流坠落高度四大要素共同决定。常规民用建筑闭式喷淋喷头工作压力维持在 $0.1\text{MPa} \sim 0.35\text{MPa}$ ，单股水流冲击荷载峰值可达 $0.3\text{kN} \sim 1.2\text{kN}$ ；大空间智能消防水炮工作压力最高可达 0.8MPa ，瞬时冲击荷载峰值可突破 3.0kN 。在结构建模取值过程中，针对普通区域，采用 0.5kN 均布等效集中荷载进行简化计算；针对中庭、大跨度展厅等大空间喷淋区域，采用动态波动荷载模拟周期性冲击效果；针对吊顶附属轻型构件，单独核算局部冲击应力，规避疲劳破损引发的次生结构灾害。同时结合荷载组合原则，明确消防荷载组合公式，极端工况下荷载组合为 1.0 恒荷载 $+0.5$ 活荷载 $+1.0$ 高温热荷载 $+1.0$ 消防积水荷载 $+0.7$ 喷淋冲击荷载，以此作为结构稳定性校核的基准工况。

二、多消防荷载耦合下结构整体稳定性数值校核

单一类型消防荷载对大型土木工程结构影响有限，但多荷载叠加耦合作用下，会产生 $1+1 > 2$ 的复合型破坏效应：高温弱化构件承载力、积水与冲击荷载增加外部受力、温度应力改变内力传递路径，多重因素叠加极易引发局部构件连锁失效。依托 BIM 结构计算模型，完成多消防荷载参数录入与工况组合，分别针对疏散阶段、消防救援阶段两大核心时段，开展多维度稳定性校核，排查内力超限、挠度超标、屈曲失稳等结构性隐患，精准界定极端火灾工况下结构安全边界。

（一）BIM 结构计算模型荷载植入方法

基于精细化 BIM 结构模型完成消防荷载植入与工况组装，整体作业分为模型预处理、荷载分区赋值、组合工况创建三大步骤。模型预处理阶段，筛选全部竖向与水平承重构件，剔除装饰构件、临时构配件等非受力模型，统一构件材质参数、截面参数、约束边界条件，同步导入前文已完善的高温力学折减系数，还原高温下构件承载力衰减特性；荷载分区赋值阶段，依据建筑空间业态与火灾风险等级，将建筑划分为轻度、中度、重度、极端四大荷载分区，按照前文既定取

值标准，分别施加对应等级的温度荷载、积水均布荷载、喷淋冲击集中荷载，实现荷载精细化分区布置，摒弃全域统一加载的粗放模式；组合工况创建阶段，参照偶然荷载组合设计原则，分别创建疏散标准工况、高强度救援工况、极端叠加工况三类组合模式，适配不同火灾发展阶段的结构校核需求，保障仿真计算贴合真实火灾作业场景。

（二）疏散阶段结构承载力专项校核

人员疏散阶段为火灾发生后 0 ~ 15min 初期阶段，该时段火情处于快速蔓延状态，自动喷淋系统全面启动，消防积水逐步堆积，环境温度稳步上升，是人员逃生的关键窗口期，结构设计底线为禁止出现任何局部构件坍塌问题。在此工况下，以承载力极限状态为校核标准，重点检测框架梁柱、楼板、剪力墙、支撑桁架等核心构件的应力分布、承载力富余系数、侧向挠度数值。结合大量仿真数据可知，疏散阶段结构主要风险并非整体坍塌，而是水平承重构件过载破损：楼板长期承受积水荷载与喷淋冲击荷载，叠加高温承载力衰减作用，易出现表层开裂、钢筋屈服、局部塌陷等病害；狭长型次梁易受温度应力影响产生侧向扭转，进而引发附属吊顶、围护墙体脱落。在校核作业中，要求所有承重构件承载力富余系数不得低于 1.2，水平构件最大挠度不得超过规范限值的 1/200，一旦参数超限，自动标记高危构件并推送优化预警，保障人员疏散全过程结构绝对安全。

（三）消防救援阶段整体稳定性校核

消防救援阶段处于火灾中后期，时长一般为 15min ~ 120min，此阶段环境温度达到峰值、构件耐火保护层性能大幅衰减、消防积水深度达到最大值，同时消防员携带重型装备进入建筑内部定点灭火，额外增加人员集中活荷载，是结构整体坍塌风险最高的阶段。该阶段校核标准相较于疏散阶段更为严苛，除常规承载力、挠度指标外，额外增设结构整体屈曲稳定系数、竖向沉降差值、节点应力三项校核指标。整体屈曲稳定系数用于判定框架结构、空间桁架结构是否存在整体失稳风险，规范要求极端偶然工况下稳定系数不得小于 1.05；竖向沉降差值用于管控不均匀沉降问题，防止主次梁脱接、柱板分离；节点应力重点校核钢混交接节点、螺栓拼接节点，规避高温荷载叠加外部荷载造成的节点断裂失效。针对校核不合格区域，划定结构高危禁区，禁止消防员进入，为消防救援指挥工作提供量化的数据支撑。

三、面向火灾工况的结构安全冗余体系优化设计

结构安全冗余是建筑消防韧性的核心组成部分，特指主体结构在局部构件高温失效、荷载超限破损后，依靠备用受力构件与多元传力路径，重新分配内部荷载、维持整体稳定性的容错能力。常规结构冗余设计仅针对地震、风荷载等常规偶然工况，未适配火灾特殊荷载耦合工况。基于多消防荷载耦合校核结果，从备用冗余构件增设、荷载传递路径优化、分区冗余等级调控三个层面，完善火灾专属结构冗余体系，提升建筑在疏散、救援、灾后降温全周期的抗坍塌能力。

（一）备用冗余承重构件针对性增设

备用冗余构件是提升局部抗火冗余最直接、最高效的优化手段，针对火灾荷载耦合校核标记的高危区域，差异化增设竖向支撑构件与水平拉结构件。对于大跨度商业中庭、悬挑会展空间、地下密闭车库等坍塌风险较高的区域，增设可拆卸式应急钢支撑柱，支撑柱采用标准化模块化设计，常态下可收纳于设备夹层、墙体边角，不占用室内使用空间；火灾高危工况下可快速投入使用，承接受损梁柱的上部荷载，阻断局部坍塌风险。对于狭长型走廊、多层互通回廊等疏散关键通道，增设水平双向拉结钢梁，强化竖向构件整体性，抵消高温温度应力带来的侧向形变；对于钢结构高层建筑核心筒周边框架，加密斜向支撑构件，提升整体屈曲稳定性。冗余构件无需全程参与常态受力，仅作为火灾极端工况下的备用防线，在控制建设成本的同时，最大化提升结构容错能力。

（二）多维荷载传递路径重构优化

单一冗余构件仅能防护局部高危点位，重构多维冗余传力体系，才能够从根源上提升整体结构抗灾韧性。传统建筑结构多采用单向主传力路径，核心承重梁柱一旦高温失效，荷载无法进行二次分配，极易引发连锁坍塌。基于 BIM 内力仿真云图，重新配比主次构件受力占比，构建多向并联式传力网络，实现荷载多路分流。在竖向受力层面，优化框架结构受力分配模式，降低核心柱体荷载占比，将部分竖向荷载分流至周边辅助柱、斜向支撑构件，形成多柱协同受力体系；在水平受力层面，打通楼板、次梁、主梁、剪力墙的联动受力通道，当局部楼板因积水荷载破损时，荷载可快速分流至周边梁板结构；在节点受力层面，升级刚性连接节点为半刚性复合型节点，提升节点形变适配能力，缓解高温应力集中问题，保障多路径传力体系稳定运行。

（三）空间分区冗余等级差异化管控

为平衡消防安全冗余与工程建设经济性,推行空间分区差异化冗余管控模式,结合空间火灾风险等级、人员重要程度,划分超高冗余、高冗余、常规冗余三个等级,适配不同功能区域。超高冗余等级适配消防救援出入口、疏散楼梯间、避难层、消防控制室等核心生命通道,此类区域冗余构件配置密度翻倍,承载力冗余系数提升至 1.5 以上,禁止任何工况下出现结构性破损;高冗余等级适配餐饮商铺、设备机房、仓储区等高起火概率区域,增设基础备用支撑构件,承载力冗余系数控制在 1.2 ~ 1.5 区间;常规冗余等级适配普通办公、闲置附属房间等低风险区域,依托原有结构体系即可满足火灾防护需求,无需额外增设冗余构件。分级管控模式能够精准分配冗余资源,避免全域高强度冗余设计造成的建材浪费与造价上浮,实现韧性与经济性双向平衡。

高温热应力、消防静态积水、喷淋动态冲击三类荷载耦合作用,是引发火灾工况下建筑局部构件开裂、楼板塌陷、整体屈曲失稳的核心诱因,明确不同火灾等级下消防荷载量化取值标准与荷载组合形式,能够填补现阶段结构防火设计中特殊荷载规范空白。依托 BIM 结构模型完成多荷载同步叠加与分阶段稳定性校核,可精准识别疏散阶段与救援阶段的结构薄弱点;通过增设模块化备用冗余构件、重构多维并联传力路径、推行分区差异化冗余管控策略,搭建适配火灾极端工况的复合型结构冗余体系。该设计模式转变传统结构防火重被动防护、轻结构内力校核的固有思维,将消防荷载纳入结构极限状态校核范畴,全方位提升现代土木工程建筑火灾抵御能力与灾后容错能力,为救援人员安全作业与被困人员顺利疏散筑牢结构安全底线。

第四节 火灾后结构损伤评估与 BIM 辅助决策

建筑火灾灾后损伤评估与结构处置,是消防韧性设计闭环的最后一环,直接决定建筑灾后修复成本、复用周期与长期服役安全性。依托 BIM 数字化平台搭建标准化构件损伤标注体系,全方位记录过火区域各类结构性病害;通过比对火灾前后构件热工与力学参数,量化承载力折减幅度并划分损伤等级;结合数字化损伤模型自动匹配加固、拆除、修复三类处置方案,实现灾后评估数字化、损伤等级量化、处置决策智能化。

一、BIM 平台下建筑火灾构件标准化损伤标注体系

火灾过后建筑结构病害类型繁杂、分布范围散乱、隐蔽性病害数量庞大，单一依靠人工文字记录无法完整留存病害位置、破损程度、病害形态等关键信息。以精细化过火 BIM 模型为载体，建立图形标注 + 属性备注一体化的标准化损伤标注体系，对混凝土裂缝、保护层脱落、钢材塑性变形、节点松动、黏结界面剥离等各类病害进行分类标注、分级存档，构建可视化、可溯源、可共享的数字化病害档案，为后续损伤量化评估提供完整的数据基础。

（一）损伤标注体系层级划分规则

结合建筑结构拆分逻辑与病害分布特征，将损伤标注体系划分为建筑层级、分区层级、构件层级、病害点位层级四级架构，由宏观至微观逐层细化标注，规范灾后评估作业流程。建筑层级主要标注过火整体范围、起火原点、火势蔓延路径、整体受损概况，界定火灾影响边界；分区层级按照防火亚单元划分受损片区，标注各分区火灾最高温度、烟熏覆盖范围、积水滞留区域，区分重度过火区、中度过火区、轻度烟熏区、未受损区域；构件层级针对独立梁柱、楼板、剪力墙、支撑构件，录入构件基础信息、受火时长、保护层破损状态、整体功能受损情况；病害点位层级为最细化标注单元，精准定位裂缝起点与终点、脱落区域轮廓、钢材形变偏移点位，同步绑定病害尺寸、破损形态、检测数据等附属属性。四级标注层级相互联动、层层嵌套，能够帮助评估人员快速定位高危受损构件，理清整体与局部的受损关联关系。

（二）混凝土构件专项病害标注细则

钢筋混凝土构件过火后病害主要包含表层烟熏碳化、防火保护层局部脱落、贯穿性与非贯穿性裂缝、内部钢筋外露、混凝土表层酥化剥落五类，针对不同病害制定专属 BIM 标注形式与属性录入标准。针对表层碳化与保护层脱落病害，采用面域标注模式，在 BIM 模型对应构件表面绘制闭合轮廓，标注受损区域面积、碳化深度、脱落厚度、过火最高温度，区分高温灼烧脱落与后期人工撞击脱落；针对结构性裂缝，依托线性标注工具复刻裂缝走向、长度、分布位置，同时录入裂缝平均宽度、最大宽度、裂缝开展深度，按照 0.2mm 为界限划分无害细微裂缝与有害结构性裂缝；针对钢筋外露与混凝土酥化病害，采用定点标注模式，备注外露钢筋牌号、锈蚀程度、酥化区域硬度检测数据。所有病害标注完成后，自

动赋予差异化颜色图层，红色代表重度损伤、黄色代表中度损伤、蓝色代表轻度损伤，直观展示混凝土构件受损分布状态。

（三）钢结构及组合构件病害标注细则

钢结构构件高温受损机理与混凝土构件存在本质区别，病害类型集中于表层防火涂层破损、钢材高温塑性形变、构件整体屈曲、螺栓焊缝节点损伤、钢材金相组织劣化五大类别，需单独制定适配钢结构的标注细则。对于防火涂层破损区域，采用面域标注，统计涂层脱落面积、剩余完整防护厚度，判断防护体系失效范围；对于钢梁挠度偏移、钢柱侧向屈曲等形变病害，利用 BIM 尺寸测量工具精准测算偏移量、扭曲角度，绘制形变曲线并录入塑性变形残余值；对于螺栓松动、焊缝开裂等节点病害，定点标注节点编号、破损类型、紧固残余力矩、焊缝开裂长度；对于高温金相劣化构件，录入材质抽样检测报告、硬度衰减系数，标记材质不可逆损伤区域。针对钢混组合构件，同步标注混凝土侧病害与钢材侧病害，补充钢筋与混凝土界面剥离长度，完整还原复合构件综合受损状态。

二、基于参数比对的构件损伤等级量化评估

依托已完成病害标注的过火 BIM 模型，调取火灾施工原始模型作为参照基准，通过横向比对两类模型中构件力学性能、几何参数、材料属性的差异化数据，量化测算承载力折减幅度、刚度衰减比例、形变残余值，依据量化指标划分无损、轻度损伤、中度损伤、重度损伤、完全失效五个等级，解决传统灾后评估依赖经验、无法量化的行业痛点，让损伤等级判定具备统一的数据标准。

（一）基准模型与过火模型参数归集

损伤量化评估前期需完成双模型参数归集与同步适配作业，双模型分别为项目竣工原始 BIM 基准模型与灾后病害标注模型。基准模型归集所有构件出厂原始参数，包含截面几何尺寸、基材抗压与抗拉强度、钢材屈服强度、弹性模量、配筋率、保护层初始厚度、节点连接刚度等常态服役参数，代表构件未过火时的最优力学性能；灾后模型归集过火后实测参数，包含受损后有效截面尺寸、残余材料强度、构件残余挠度、保护层剩余厚度、裂缝等效损伤系数、节点残余刚度等实测数据。在评估作业前，统一双模型坐标系、构件编号、分层分区规则，完成构件一一对应匹配，规避模型错位、参数错配问题，为后续参数差值计算、性能折减分析奠定基础。

（二）多维度力学参数折减量化计算

从强度性能、刚度性能、几何性能、节点性能四个维度，开展参数差值计算，量化构件受损程度。强度层面，对比过火前后混凝土抗压强度、钢材屈服强度、界面粘结强度的数值变化，计算材料强度折减率，判定高温对基材本体的不可逆损伤程度；刚度层面，测算构件弹性模量衰减比例、抗弯刚度残余系数，分析构件抵抗形变能力的下降幅度，重点评估悬挑梁板、薄壁钢构件的刚度劣化状态；几何层面，统计裂缝等效损伤面积、塑性形变残余值、保护层脱落占比，量化外部病害对构件使用寿命的影响；节点层面，核算螺栓紧固力矩衰减率、焊缝有效承载长度折减系数，判断连接节点是否仍满足受力设计要求。四项维度指标相互补充，全方位覆盖构件本体与连接节点的损伤特征，保障量化评估结果的完整性与精准性。

（三）结构构件损伤等级划分标准

结合四大维度量化折减数据，以承载力残余占比为核心判定指标，辅以刚度衰减系数、病害分布范围，建立五级损伤等级划分标准。无损等级：构件各项参数偏差低于 3%，无任何结构性病害，仅存在表层烟熏痕迹，无需开展任何处置作业；轻度损伤等级：承载力折减低于 10%，仅存在细微无害裂缝、局部表层涂层破损，构件整体受力性能不受影响，仅需简易表面修复；中度损伤等级：承载力折减 10% ~ 30%，出现少量贯穿性裂缝、局部保护层脱落、钢材轻微形变，构件仍可短期服役，需针对性加固后方可投入使用；重度损伤等级：承载力折减 30% ~ 60%，结构性裂缝密集分布、钢筋大面积外露、钢构件塑性形变严重，构件禁止投入使用，必须开展专项加固改造；完全失效等级：承载力折减大于 60%，构件丧失基础受力能力，存在坍塌风险，需直接拆除报废。该分级标准统一行业灾后评估量化依据，有效规避人工经验判定的主观性偏差。

三、BIM 数字化损伤模型辅助灾后结构处置决策

在完成构件损伤等级量化分级之后，以五级损伤标准为决策依据，依托 BIM 数字化损伤模型的可视化优势、工程量统计优势、方案模拟优势，针对不同受损等级构件，智能匹配表面修复、结构加固、整体拆除三类差异化处置方案。同时依托模型自动统计修复材料、加固构件、拆除废料的工程量，模拟不同处置方案的施工工序与施工成本，辅助设计、施工、运维多方主体完成最优决策，缩短灾

后评估与修复周期，降低建筑灾后复用成本。

（一）轻度损伤构件表面修复方案制定

针对无损与轻度损伤等级构件，以表面修复、病害消除、防护层复原为核心处置目标，制定低成本、短周期的简易修复方案。混凝土轻度损伤构件主要处置内容包含烟熏表层清洗、细微裂缝注浆封闭、局部脱落保护层修补，依托 BIM 模型标注的病害面积、裂缝长度数据，自动核算修补砂浆、封缝胶、防火涂料的材料用量；钢结构轻度损伤构件重点修复破损防火涂层、校正毫米级微小形变，清理构件表层锈蚀区域，重新喷涂适配型号的防火涂料，恢复构件被动防火能力。同时在 BIM 模型内模拟修复施工流程，明确基层处理、材料涂刷、养护成型的标准化工序，输出简易施工交底图纸与材料采购清单，指导现场施工人员快速完成修复作业，最大化压缩轻度受损区域的复工周期。

（二）中重度损伤构件专项加固方案优化

中度与重度损伤构件是灾后处置工作的重难点，此类构件本体力学性能出现不可逆衰减，单纯表层修复无法恢复服役性能，需采用外包混凝土加固、粘贴碳纤维加固、外粘型钢加固、增设支撑构件四种主流工艺开展专项加固。依托 BIM 损伤模型，结合构件受损部位、承载力缺口数值，智能匹配最优加固工艺：受弯为主的梁板构件优先采用碳纤维布粘贴加固工艺，施工便捷且自重增量极小；受压为主的框架柱构件选用外包混凝土或外粘型钢加固工艺，提升构件抗压与抗屈曲能力；局部受损的悬挑构件增设冗余支撑构件，分担外部荷载。同时在模型内完成加固构件精细化建模，自动统计碳纤维材料、型钢、加固混凝土、锚固螺栓的分项工程量，对比不同加固方案的造价成本、施工周期、加固效果，择优输出性价比最高的加固设计方案，并同步完成加固后承载力复核仿真，保障加固方案安全合规。

（三）失效构件拆除与整体布局重构

针对完全失效等级构件，此类构件已丧失基础受力能力，且加固改造成本高于重建成本，同时长期留存易引发二次坍塌事故，需制定专项拆除方案并重构局部结构布局。依托 BIM 模型划定拆除作业禁区，标注拆除构件空间位置、关联受力构件，预判拆除作业对周边完好结构的内力影响，优化拆除顺序，遵循“附属构件优先、承重构件后置、水平构件优先、竖向构件后置”的拆除原则，规避拆除过程中的连锁坍塌风险。模型自动统计拆除构件废料体量、可回收建材占比，

编制建筑垃圾处理方案与可再生资源回收方案；拆除作业完成后，结合原始结构受力体系，重新规划局部承重布局，增设全新承重构件补足荷载传递路径。此外，将拆除、加固、修复全部处置数据录入 BIM 运维模型，更新构件服役档案，为建筑后续常态化防火运维提供数据支撑。

依托 BIM 平台搭建四级联动式标准化损伤标注体系，能够全方位收录过火区域混凝土、钢结构、组合构件的各类结构性病害，构建完整可视化数字化病害档案；通过归集火灾前后双模型力学与几何参数，从强度、刚度、几何、节点四个维度量化构件承载力折减幅度，建立五级统一化损伤等级判定标准，推动灾后评估由经验定性转向数据定量。基于数字化损伤模型，针对不同受损等级构件分别匹配表面修复、专项加固、整体拆除三类处置方案，并完成工程量自动统计、施工方案模拟、成本对比分析，辅助工作人员快速完成科学决策。整套数字化灾后评估处置体系，有效解决传统火灾后结构评估效率低、主观性强、决策依据不足等行业痛点，能够大幅缩短建筑灾后评估周期、降低修复造价、提升结构复用安全性，完善现代土木工程全周期消防韧性设计体系。

第七章 消防系统与土木工程基础设施的集成设计

第一节 消防水系统管网与建筑结构协同布置

现代复合型建筑内部消防水系统包含喷淋管网、消火栓管网、消防供水泵房、储水水池、输水主干管等多项子系统，管道排布错综复杂、空间覆盖范围广，极易与建筑承重结构、土建基础构造产生空间冲突。传统设计模式采用结构先行、消防后置的分步设计思维，结构图纸与消防管网图纸独立编制，极易出现管道穿梁、构件随意开洞、套管定位偏差、设备基础冲突等施工通病，不仅削弱结构承载力，还会增加加固成本、延误施工工期。依托 BIM 数字化协同设计平台，整合全套结构模型与消防水系统模型，推行结构与消防一体化同步设计模式，从空间避让、设备统筹、预埋预留三个维度优化管网布局，破解管线结构干涉难题，实现土建施工与消防安装同步落地，全面提升建筑消防水系统设计合理性与施工落地质量。

一、BIM 一体化协同设计体系搭建与运行机制

消防水系统与建筑结构协同布置的核心前提，是打破不同专业之间的设计壁垒，改变传统分立设计、后期碰撞整改的被动模式。借助 BIM 技术多专业集成建模、实时碰撞检测、参数同步联动的核心优势，搭建涵盖结构专业、给排水消防专业、土建施工专业的一体化协同设计平台，明确各专业建模标准、权限划分、整改流程，构建标准化协同作业体系，从设计源头规避管网与结构的深层次矛盾，适配高层住宅、商业综合体、地下车库等多类型建筑的消防管网布设需求。

（一）多专业集成模型标准化构建

集成化 BIM 模型是协同设计工作的基础载体，建模阶段需要统一各专业坐标系、构件命名规则、模型精细度标准，保障结构模型与消防水系统模型能够无缝融合、精准匹配。在结构模型搭建层面，设计人员需要完成建筑全专业承重体

系精细化建模，完整涵盖基础底板、框架梁柱、现浇楼板、剪力墙、结构次构件、悬挑构件等所有受力结构，同步录入构件截面尺寸、混凝土强度等级、配筋参数、结构受力等级、禁止开洞区域等核心属性，明确结构高危保护区域，为消防管网避让设计提供参考依据。针对地下室、设备夹层、楼层吊顶等管线密集区域，需要细化结构节点构造，完善梁体加腋、主次梁交接、楼板变截面等隐蔽部位模型，杜绝因模型简化导致后期碰撞检测失效的问题。在消防水系统建模层面，依据消防设计规范，分别搭建自动喷淋系统、室内消火栓系统、消防供水系统三大子模型，建模对象包含输水主干管、分支配管、喷淋末端装置、消火栓设备、稳压阀门、泄压装置、专用支吊架等配套构件，按照管路管径、压力等级、介质属性分类建立专属族库，严格参照规范限定管道敷设坡度、弯曲半径、安装高度，保证消防管网模型完全符合消防验收标准。多专业模型统一集成至同一项目文件后，完成图层分类管理，区分结构受力层、消防主管层、消防支管层、设备附属层，便于后续分区调整与专项优化。

（二）协同设计平台权限与分工机制

为避免多人员、多专业同步建模出现的版本错乱、设计重叠、权责模糊等问题，需制定分级权限管理机制与专业化分工制度，适配设计院、施工单位双主体协同作业模式。平台权限划分为管理员权限、结构设计权限、消防设计权限、施工查看权限四大层级，管理员主要负责统一建模标准、维护模型版本、归档设计资料，统筹整体协同设计进度；结构设计人员仅可编辑结构模型相关内容，负责划定禁止开孔区域、明确结构加固阈值、反馈结构受力风险，审核消防管网开孔申请；消防设计人员主要负责消防水系统模型优化调整，根据结构约束条件迭代管网敷设路径，提交套管预埋、结构开洞相关作业申请；施工人员仅具备模型查看、碰撞问题反馈权限，结合现场施工条件提出优化建议，保障设计方案贴合现场施工实际。分工层面实行“结构划定红线、消防适配优化、多方联合审核”的作业模式，结构专业优先划定核心承重梁柱、厚剪力墙、基础底板等禁止扰动红线区域，消防专业在红线范围外完成管网初步排布，针对特殊工况必须穿洞的区域，双向沟通协商，联合制定开洞与加固方案，平衡消防使用功能与结构安全性能。

（三）常态化碰撞检测与迭代优化流程

碰撞检测是 BIM 协同设计规避管线结构冲突的核心功能，相较于传统二维图纸人工排查模式，自动化碰撞检测能够全面识别硬碰撞、软碰撞、间距不足三

类隐患问题，覆盖全楼层、全构件、全管线，排查效率与精准度大幅提升。结合消防水系统布置特征，设定专项碰撞检测规则，硬碰撞检测重点排查消防管道与承重梁、剪力墙、钢筋骨架、基础主筋的直接干涉问题；软碰撞检测针对管道支吊架、阀门设备与非承重隔墙、装饰构件的冲突问题；间距检测严格参照规范，校验消防管道与强电管线、暖通管线、燃气管道的安全敷设间距，规避后期运行阶段的安全隐患。检测作业按照周度常态化开展，初次检测完成后自动生成碰撞问题报表，标注冲突位置、冲突类型、涉及构件，由对应专业设计人员限期完成整改；整改结束后启动二次复核检测，形成“检测—整改—复核—归档”的闭环优化流程。针对反复整改仍无法解决的重难点问题，组织线上多方会审，结合结构受力验算、管网水力计算结果，确定最优解决方案，从根本上杜绝后期施工阶段大面积设计变更。

二、基于结构保护原则的消防管网路径优化策略

消防管道穿透承重构件、过度挤占结构有效截面，是造成建筑结构承载力下降、耐久性衰减的主要诱因。混凝土梁、柱作为竖向与水平核心受力构件，内部钢筋骨架承担主要荷载，盲目开孔会切断纵向受力钢筋与箍筋，降低构件抗弯、抗剪性能；基础与底板随意开洞还会破坏结构防水体系，引发地下水渗漏、钢筋锈蚀等次生病害。基于 BIM 集成模型，以最大化保护承重结构为基本原则，优化消防管网敷设路径，从梁体避让设计、密集区域管线排布、特殊构件防护三个角度，实现管网与结构和谐共存。

（一）核心承重梁体专项避让设计

框架梁是水平受力体系的核心组成部分，也是消防管道敷设冲突最多的结构构件，过往工程中常出现消防管道横穿主梁中和轴、密集开孔叠加布置的违规设计行为，给建筑结构埋下长期安全隐患。依托 BIM 模型剖切功能，剖析各类截面梁体内部钢筋排布规律，明确梁体禁止开孔区域与可开孔安全区域，主梁中和轴上下 200mm 范围、梁端剪力加密区、主次梁交接节点统一划定为绝对禁止区域，任何消防管道不得横穿；对于次梁非加密区、主梁边角低应力区域，在结构受力验算合格的前提下，可少量开设小型孔洞。在管网路径优化过程中，优先采用梁下绕行、穿板敷设、侧向绕行三种替代方案，替代传统穿梁敷设模式。针对单层管径较大的消防主干管，统一采用梁下吊顶内敷设方式，利用楼层吊顶富余空间

完成管线排布；针对多层小型喷淋支管，优化竖向标高，穿过楼板非受力薄弱区域完成跨区布设；针对局部狭长受限空间，调整管道走向，从梁体侧面空隙绕行。同时在 BIM 模型中对比多种绕行方案的造价、水力损耗、空间占用率，择优选用综合效益最优的排布形式，兼顾结构安全与消防供水效率。

（二）管线密集区域分层排布优化

地下室设备机房、楼层走廊、中庭周边吊顶区域，集中排布消防水管、暖通风管、强弱电桥架等多类管线，空间资源紧张、管线交叉繁多，是管网结构冲突的重灾区。单一避让模式无法适配密集管线区域，需要推行分层分级排布策略，结合 BIM 模型竖向排布模拟功能，统筹规划各类管线标高与平面位置。竖向分层层面，遵循“小管避让大管、柔性管线避让刚性管线、弱电避让强电、消防管线优先适配结构”的排布原则，自上而下依次排布弱电桥架、强电桥架、小型喷淋支管、暖通风管、消防消火栓主管；严格控制消防水管竖向标高，规避多层管道叠加挤压结构梁体的问题。平面布局层面，将消防主管集中布置在结构次梁间隙、楼板预留凹槽等低影响区域，禁止沿主梁、剪力墙线性密集排布；交叉位置优先调整消防支管走向，微调弯曲角度，避免管道叠加开孔。此外，针对管线密集区域单独创建专项排布节点详图，细化管道间距、支吊架安装位置，为施工现场提供直观的三维交底图纸，降低施工偏差。

（三）特殊承重构件防护管控方案

除常规梁柱构件外，剪力墙、预制装配式构件、大跨度悬挑结构等特殊构件，受力逻辑复杂、冗余安全储备较低，无法承受管道开孔扰动，需要制定专属防护管控方案。对于钢筋混凝土剪力墙，尤其是高层建筑核心筒剪力墙，此类构件承担侧向风荷载与地震荷载，整体性要求极高，设计阶段直接禁止任何消防管道横向穿透，竖向消防立管统一依附墙体侧面敷设，采用专用侧向支吊架固定，杜绝墙体开孔作业；对于装配式预制梁柱、叠合楼板，预制构件出厂前已完成配筋浇筑，现场开孔无法二次补强，因此预制构件全域划定为禁止开孔区域，消防管网全部绕行避让。对于大跨度悬挑梁板、空间桁架结构，该类构件长细比较大，局部截面破损极易引发屈曲失稳，除常规避让外，还需在 BIM 模型中叠加荷载工况，校核管网自重、水流冲击荷载对悬挑结构的附加影响，严控管线荷载增量，全方位保护特殊结构构件的服役性能。

三、设备与预埋构件一体化同步设计施工

消防水池、供水泵房作为消防水系统的核心动力储水设备，体量庞大、自重荷载较高，且多设置于地下室底板区域；套管、管道支墩作为配套预埋构件，分布于建筑全楼层结构构件内部。传统分步设计模式下，设备基础与结构底板独立设计、预埋构件后期打孔安装，不仅增加结构二次开洞工程量，还易出现设备基础沉降不均、套管错位、支墩脱落等施工质量问题。依托 BIM 模型统筹设备与预埋构件布局，同步完成基础设计、套管定位、支墩布设，实现土建结构施工与消防设备安装一体化同步作业。

（一）消防水池与泵房基础协同设计

地下消防水池多为钢筋混凝土封闭式箱体结构，直接与地下室底板、基础承台相连，满水状态下整体荷载可达数百千牛，若基础布局不合理，极易引发不均匀沉降，进而造成池体开裂、管网接口断裂等病害。在 BIM 协同设计过程中，将消防水池、稳压泵房、配套控制柜整体纳入结构基础模型，结合基础承台、地梁排布规律，优化水池平面位置，优先将水池布置在多承台交汇区域，利用原有基础受力体系承担储水荷载，无需额外增设独立筏板基础，减少混凝土浇筑工程量。同时开展荷载组合验算，叠加水池自重、满水荷载、底板恒活荷载、地下水浮力等多类工况，校核基础承载力与沉降差值，根据验算结果调整底板配筋方案，对高荷载区域增设双向附加钢筋，强化基础承载能力。泵房设备区域同步优化设备基础标高，统筹进水管与底板、侧墙的连接位置，提前预留专用过水孔洞，规避后期大功率开孔作业。

（二）全域预埋套管精准定位布设

预埋套管主要用于消防管道穿越楼板、墙体、基础构件的专项防护，提前预埋套管能够替代后期人工开孔，保护结构钢筋完整度，同时提升管道密封防水性能。依托 BIM 三维可视化优势，统一完成穿墙套管、穿楼板套管、防水密闭套管的精准定位与参数赋值，构建标准化预埋套管族库，按照管道管径匹配对应规格套管，明确套管内径、壁厚、预埋长度、止水翼环尺寸等核心参数。平面定位层面，以结构轴线为基准，标注每一处套管的精准坐标、敷设标高、倾斜角度，并同步关联对应消防管道，保证套管与管线一一对应；竖向定位层面，针对地下室防水区域、卫生间涉水区域，选用带止水翼环的防水专用套管，严格控制套管

预埋深度，与结构构件浇筑融为一体。所有套管点位全部录入 BIM 明细表，分类统计不同规格套管的数量、位置、适用区域，直接输出预埋施工清单，交付土建班组与消防安装班组，实现预埋作业标准化、精准化。

（三）管道支墩与固定支架一体化布设

消防主干管自重较大，长距离悬空敷设易产生竖向挠度形变，需要依托混凝土支墩、金属固定支架分担管道荷载，现阶段多数项目支墩与支架采用后期后置安装模式，通过膨胀螺栓固定于结构表面，易造成混凝土表层破损、螺栓锚固失效等问题。一体化同步设计模式下，在 BIM 模型内提前规划所有管道支墩、固定支架的布设位置与结构形式，大型主干管配套混凝土支墩直接与结构楼板、梁体同步浇筑成型；中小型支管金属支架提前预埋锚固螺栓，替代后置膨胀螺栓。同时结合管道水力工况，测算水流启停产生的轴向推力，优化支架排布间距与加固形式，在管道弯头、三通、阀门等应力集中部位增设防晃支架，提升管网整体稳定性。同步将支墩、支架模型纳入集成检测范围，排查支架与结构钢筋、预埋套管的碰撞隐患，从源头完善预埋配套体系，实现土建浇筑与消防预埋同步施工、同步验收。

搭建多专业 BIM 一体化协同设计平台，统一建模标准与分工机制，依托自动化碰撞检测技术迭代优化方案，能够彻底打破结构专业与消防水系统专业分立设计的行业桎梏。以承重结构保护为核心目标，优化消防管网敷设路径，通过梁体绕行、密集区域分层排布、特殊构件全域防护等手段，从根本上减少消防管道对梁柱、剪力墙、预制构件的开孔扰动；统筹消防水池、供水泵房与建筑基础的空间布局，同步完成预埋套管、管道支墩的定位与浇筑作业，规避二次开洞与后置安装带来的结构损伤。该协同设计模式有效降低结构加固成本、缩短项目整体施工周期，兼顾建筑结构安全性、消防供水稳定性与空间利用高效性，为高层及大型公共建筑消防水系统精细化集成设计提供成熟的数字化实施路径。

第二节 防排烟竖井、管道井的结构整合设计

防排烟系统作为现代高层建筑、大型公共建筑主动防火体系中不可或缺的核心组成部分，承担火灾烟气疏导、室内空气补给、逃生环境保障等关键功能，系统整体运行质量直接决定火灾工况下建筑内部人员疏散成功率与建筑物本体的防火抗灾能力。基于 BIM 数字化集成设计平台，打破多专业之间的信息孤岛，将结构有限元受力验算、火灾动力学仿真分析、竖向空间集约化统筹规划三类现代化技术手段融为一体，在方案阶段同步优化竖井平面位置、完善隔热防火构造、整合多类型竖向管井资源，实现防排烟系统、附属竖向管井设施与主体土木工程结构全方位、深层次一体化整合设计，在稳固建筑结构体系、降低土建改造成本的基础上，同步提升建筑消防减灾性能、结构耐高温性能与整体空间利用效率。

一、防排烟竖井与主体结构适配布局规划

与水平敷设的喷淋管网、消火栓管道不同，防排烟竖井、正压送风井等竖向管井具备竖向贯通性、空间固定性、结构依附性、功能不可替代性四大核心特征，该类构筑物自建筑方案初创阶段便需要敲定平面坐标、截面长宽、竖向贯通层数、依附墙体类型以及防火封堵标准，属于建筑定型类构件。

（一）结构受限区域判定与布局红线划定

高层建筑框架—剪力墙结构、筒体结构体系内部存在多处结构敏感受限区域，该类区域承担建筑绝大多数竖向静力恒活荷载、水平风荷载以及地震往复荷载，结构安全冗余储备极低，抗外部扰动能力薄弱，属于结构设计中的红线管控区域。若在该类受限区域内盲目开凿、增设防排烟竖井，为适配竖井形制需要大面积拆除剪力墙墙体、裁切框架附属构件、破除楼板受力钢筋，不仅会大幅增加后期结构加固、钢筋补强、混凝土重新浇筑的工程量，直接提升项目整体土建造价，严重情况下还会破坏建筑整体抗侧力受力体系，降低结构抗震设防等级，给建筑全生命周期服役埋下永久性、不可修复的安全隐患。依托精细化 BIM 结构三维模型，嵌入有限元内力分析模块，分别模拟常态日常服役工况、多遇地震工况、罕遇地震工况、极端风荷载工况下建筑整体内力分布、局部应力集中区域及结构薄弱构件位置，以此数据为基础划定防排烟竖井专属布局红线，明确绝对禁止布设区域、限制性布设区域以及优先适配区域。其中，建筑核心筒内部承重主剪力墙、

外围环形抗震剪力墙、超大跨度框架梁两端支座区域、地下室基础承台及筏板上部对应区域、高空悬挑结构根部受力集中区域、结构转换层厚板及转换梁柱全域，统一划定为绝对红线管控区域，该区域内全域禁止增设任何类型的排烟竖井与补风竖井；核心筒内部非承重加气混凝土填充墙区域、疏散楼梯间两侧闲置附属空间、楼层边角未参与受力的冗余空白区域、专用设备夹层闲散区域，划定为竖井优先适配布设区域，作为防排烟竖井的主要落位点位。与此同时，利用 BIM 模型纵向剖切功能，逐层核对标准层、设备转换层、消防避难层、底层大堂的结构构件排布差异，排查不同楼层剪力墙偏移、梁柱截面变更、配筋规格升级等客观问题，严格保障竖向竖井上下同轴对齐，规避因楼层构件错位，被迫裁切竖井截面、二次改造结构墙体的额外施工成本，从数字化设计层面简化施工工序、降低施工难度。

（二）基于防火分区的竖井点位优化设计

防排烟竖井的平面落位直接决定单一防火分区内部高温烟气排出效率、风机额定负荷参数、水平支管敷设总长度与管路阻力损耗，同时间接决定结构墙体拆除体量、加固补强范围以及土建整体施工难度，是竖井一体化整合设计中最为核心的控制要素。在 BIM 集成模型中调用防火分区智能划分模块，严格依据现行《建筑防烟排烟系统技术标准》（GB 51251）相关规范细则，结合建筑业态属性拆分独立防火单元，商业综合体、地下车库、餐饮后厨等高危防火分区单独进行专项参数核算与竖井布局。针对每一处独立防火分区，精准测算分区单层建筑面积、人员峰值容纳数量、可燃物荷载总量、火灾热释放速率四项基础参数，结合高温烟气上浮扩散基本规律，科学核算排烟竖井最小截面尺寸、最优送风风量、竖井布设数量以及水平支管最大敷设半径。平面布局层面，始终遵循“就近服务、居中辐射、远离承重核心、贴合疏散体系”的综合性布局原则，将排烟竖井、补风竖井优先布置在防火分区几何中心位置，缩短水平排烟支管的敷设距离，减少管路局部阻力与沿程阻力，降低排烟风机长期运行能耗与设备采购规格；同时硬性把控竖井与承重核心柱、主剪力墙、转换受力构件的安全间距，常规民用建筑间距阈值控制在 1.5m 以上，超高层建筑、大跨度综合体建筑间距提升至 2.0m 以上，最大限度减少竖井围护墙体对核心受力构件的挤占与裁切。针对建筑面积超过 2000 m² 的超大型复合型防火分区，摒弃传统单一竖井集中排烟的老旧设计模式，采用多竖井分布式均衡布设方案，将整体排烟负荷拆分至多个小型竖井之中，

规避超大截面竖井大面积裁切剪力墙的问题，在强化分区排烟能力、缩短烟气排出时间的同时，进一步保障主体结构完整性，实现消防使用功能、结构安全性能与工程经济性能三者动态平衡。

（三）竖井截面形制与结构适配调整

现阶段国内民用建筑防排烟竖井截面形制以标准矩形、正方形为主，少部分边角受限空间采用异形倒角截面，截面长宽、围护壁厚、开孔面积主要由排烟设计风量、风机送风风速、配套风管敷设数量、日常检修作业空间需求共同决定，截面规格是否适配周边结构，直接影响结构改造体量、室内空间占用率与后期运维便捷度。传统设计模式下，消防暖通设计人员大多直接套用行业标准化固定截面尺寸，并未结合竖井周边梁柱排布、墙体模数、结构受力薄弱点进行动态微调优化，标准化截面适配性较差，极易出现截面尺寸过大浪费室内商用空间、截面形态与周边构件冲突被迫裁切承重墙体、检修空间不足无法维保设备等多种问题。基于 BIM 三维可视化模型开展多方案比选分析，针对同一布设点位，拟定 2 至 3 种不同截面形制、不同长宽比例的设计方案，从结构改造工程量、空间占用面积、模板施工难易程度、后期检修便捷度四个维度进行综合量化评分，择优确定最优截面方案。对于依附规整填充墙布置的常规排烟、补风竖井，优先采用标准矩形截面，适配建筑墙体通用模数，降低模板定制与现场浇筑难度；对于楼层边角、梁柱夹缝等空间狭小的受限区域，优化边角构造，采用圆弧倒角异形截面，适配局部不规则空间，仅裁切闲置填充墙体，坚决规避改造承重构件；对于贯穿多层楼层、服务多个防火分区的大型主排烟竖井，摒弃单一大截面竖井设计方案，将大截面竖井拆分为多个小型并列式竖井组团，分散结构扰动范围，相较于单一大孔径竖井，能够有效降低剪力墙拆除面积与后期加固工程量，弱化竖向空洞对结构整体性的负面影响。除此之外，结合建筑耐火等级统一规范竖井围护墙体基础厚度，一类高层建筑竖井墙体厚度不低于 150mm，二类高层建筑不低于 100mm，地下密闭空间强制提升至 200mm，既满足 2h 及以上耐火极限的防火隔热需求，又能严控墙体占用面积，全方位提升建筑空间利用效率。

二、高温烟气传热模拟与竖井防火隔热构造设计

当建筑发生火灾并启动防排烟系统后，竖井内部会持续流通 200℃~600℃区间的高温有毒烟气，烟气在竖向密闭竖井内形成上浮式高压气流，通过热传导、

热辐射、热对流三种换热方式持续加热竖井围护墙体,热量由内壁逐步向外壁缓慢渗透,最终传递至周边紧邻的框架梁柱、剪力墙、楼板等承重构件。为精准量化高温烟气对土木工程结构的损伤阈值,规避经验化设计带来的防护冗余不足或过度投资问题,依托 BIM 与 Fluent 有限元仿真软件构建双向耦合分析体系,完整模拟轻度、中度、重度三类火灾等级下竖井内部高温烟气流动特征、热量扩散路径以及周边结构温度变化规律,精准定位高温聚集防护薄弱区域,针对性匹配分层式防火隔热构造,制定差异化隔热、防火、补强方案,全方位隔绝高温余热对主体承重结构的负面影响。

(一) BIM-Fluent 耦合仿真模型搭建

为真实还原火灾不同发展阶段下,防排烟竖井内部高温烟气流速、温度分布、换热强度及热量渗透范围,保证仿真分析结果具备工程指导价值,本次设计采用 BIM 前置精细化建模、Fluent 后置数值仿真的耦合分析模式,搭建专属热力仿真计算模型,同时兼顾静态蓄热与动态排烟双重工况,提升仿真数据精准度。建模阶段,在已完成布局优化的第二节专用 BIM 模型中,精准提取防排烟竖井本体、围护填充墙体、周边直接接触的承重梁柱、水平排烟支管、防火封堵节点等核心分析构件,剔除装饰面层、简易检修门、小型紧固件等对热力分析无影响的附属构件,简化微小边角倒角构造,降低网格剖分难度与软件运算负荷。模型导出为通用中间格式后,导入 Fluent 仿真平台完成模型重构与结构性网格剖分,对竖井内壁、烟气进出口、墙体交接缝隙、梁柱受热面等关键换热区域进行网格加密处理,网格尺寸控制在 5mm ~ 15mm 范围内,保障核心区域仿真精度;非关键区域采用粗网格划分,平衡运算精度与运算时长。参数设定层面,严格参照 ISO834 国际标准火灾升温曲线设定基础参数,划分两种典型运行工况:第一种为静态蓄热工况,模拟火灾初起阶段、排烟风机未启动状态,烟气滞留竖井内部缓慢蓄热,主要测算纯热传导模式下墙体与周边构件的受热损伤;第二种为动态气流工况,模拟风机启动后正常排烟状态,高温烟气高速竖向流动,综合测算热对流、热辐射双重作用下结构受热特征。同时完整录入围护墙体、钢筋混凝土结构、防火保温材料、耐高温密封胶等材料的高温导热系数、比热容、热膨胀系数等热工参数,为后续热力耦合计算提供精准的数据支撑。

(二) 高温传热规律与结构损伤特征分析

结合仿真输出的全域温度云图、局部热流密度分布曲线、构件温度时序变

化曲线,可系统性研判不同工况下高温烟气的换热机理、热量聚集区域以及对周边土木工程结构的损伤演化特征,为隔热构造设计提供量化数据支撑。仿真结果表明,动态排烟工况下竖井内壁直接接触高温烟气,内壁表层温度可在10min内快速升至350℃以上,热量以指数形式由内向外逐层传导;0~30min为热量快速渗透阶段,围护墙体外侧温度稳步上升,但热量尚未传导至外部承重构件,结构整体无明显损伤;30~60min为热量稳态扩散阶段,墙体整体温度趋于平衡,局部高温点位开始向相邻梁柱传递热量;60min之后,高温逐步渗透至周边混凝土承重构件,构件表层温度突破150℃,混凝土内部自由水快速蒸发,表层出现大量细微温度裂缝,结构耐久性开始衰减;120min极端火灾工况下,紧邻竖井1m范围内的承重构件局部温度可达250℃~300℃,混凝土抗压强度出现10%~20%的不可逆折减,内部受力钢筋锈蚀速率提升3倍以上,大幅缩短构件服役年限。除此之外,烟气弯道换向位置、排烟风机接驳端口、竖井楼层交接位置、检修门周边缝隙,极易出现涡流效应造成热量聚集,局部温度相较于平直区域高出50℃~80℃,是防火隔热防护的重中之重,在构造设计过程中需要进行专项加厚补强处理,杜绝高温隐患。

(三) 分层复合式防火隔热构造配套设计

结合高温传热仿真得出的损伤规律与高温薄弱点位,采用分层复合式构造设计理念,由内至外依次设置防火饰面层、隔热保温层、抗裂防护层、结构加固补强层,四层构造协同作用、各司其职,全方位阻断高温热量向外传递,适配不同火灾等级、不同持续时长的防护需求。内层防火饰面层选用高密度耐火硅酸钙板材,该材料具备耐高温、耐烟气冲刷、抗热交变、不易脱落等综合优势,直接直面高温烟气与明火灼烧,常规厚度设置为15mm,耐火极限不低于2h,可有效抵御表层高温侵蚀与酸性烟气腐蚀;中间隔热保温层采用岩棉、超细玻璃棉复合型阻燃保温材料,填充厚度统一设置为40mm,针对涡流高温聚集区域加厚至50mm,依托材料低热传导系数的特性,吸收滞留余热,弱化热传导与热辐射效率;外层抗裂防护层采用聚合物抗裂砂浆搭配双层耐碱网格布,覆盖于保温层外侧,防止温度交变、干湿交变引发墙体表层开裂、保温层脱落等病害;最外侧结构加固补强层针对紧邻竖井的高敏感承重梁柱,外包加厚型防火混凝土保护层,补齐高温造成的强度折减。与此同时,优化竖井细部节点构造,在竖井墙体与主体结构交接缝隙、检修门缝隙填充耐高温防火密封胶,彻底封堵烟气余热渗透通道;

在烟气弯道、风机接驳口等高温聚集区域增设弧形隔热内衬，消除涡流死角，降低局部热应力集中风险，通过多重构造组合，构建全方位、多层次的竖井防火隔热防护体系，切实保护周边主体结构长期服役安全。

三、竖向管井集约化整合与空间统筹管控

依托 BIM 三维集成建模优势，统筹整合建筑全域范围内所有竖向功能性管井，依据设备运行属性、安全防护要求、截面规格大小、后期检修条件进行集约化重组整合，构建模块化复合型竖向管井组团，统一规划组团平面布局、围护墙体构造、防火分隔措施与专属检修通道，在保障各子系统独立运行、互不干扰的基础上，压缩无效空间占用，修复墙体碎片化缺陷，强化结构墙体整体性，实现消防防排烟设施、各类机电管井与土木工程基础设施的深度一体化融合。

（一）竖向管井分类整合基本原则

竖向管井集约化整合并非简单将不同功能管井随意堆叠、合并空洞，盲目整合极易引发火灾竖向蔓延、高压电磁干扰、管道渗漏短路、有毒气体窜仓等次生安全事故，因此整合作业必须严格遵循消防安全、电气安全、结构适配、检修便捷四大基础性设计原则，规范化管控管井组合模式、排布间距与相对位置。消防安全原则：高温排烟井、加压送风井等高温消防竖井，禁止与燃气管道井、蓄电池配电井等易燃易爆管井直接贴合布设，两类管井最小安全间距不得小于 0.8m，同时设置实心防火隔离墙，规避高温烟气引燃易燃易爆介质；电气安全原则：高压强电输送井与弱电信号通信井必须设置实体防火隔墙进行硬性隔离，防止高压电流产生的电磁场干扰弱电信号传输，且两类电气管井统一远离给排水、消防水管井，最小间距不低于 1.0m，避免管道渗漏引发电路短路、漏电事故；结构适配原则：所有复合型管井组团优先依附规整非承重填充墙布设，组团外轮廓尽量设计为标准矩形，规避异形裁切结构墙体，最大限度降低结构改造与加固成本；检修便捷原则：复合型管井组团的所有检修门、操作口统一朝向公共走廊、设备专用通道等公共开放区域，严禁设置于商铺、办公室、客房等私密室内空间，保障后期运维、故障排查、设备更换作业能够高效开展。

（二）复合型竖向管井组团布局优化

基于上述四大整合原则，结合 BIM 模型防火分区划分结果与室内空间布局特征，将建筑全域竖向管井划分为消防给排水复合型组团、电气配套专属组团、

防排烟独立专用组团三大标准化模块,实现分类集中、分区管控、专业适配。消防给排水复合型组团整合高温补风井、常规排烟井、生活给水立管井、污水排水井、雨水立管井五大子井,集中布置在卫生间、设备机房、后厨等固有涉水功能区域,适配给排水管网敷设规律,便于统一做防水卷材铺设与防火封堵处理;电气配套专属组团整合高压强电井、低压配电井、网络弱电井、通信信号井,优先布置在楼层边角、走廊端头、远离水源的干燥区域,从物理层面规避渗水短路风险;防排烟独立专用组团单独收纳大型主排烟竖井、疏散前室正压送风竖井,就近毗邻疏散楼梯间、避难前室布置,缩短送风支管敷设长度,快速完成疏散区域烟气排出与新风补给。在 BIM 模型内完成组团精细化排布,优化组团内部各子管井的排布顺序、安全间距、检修门朝向,统一组团围护外轮廓尺寸,将原本零散分布的小型独立管井整合为标准化大型管井模块,减少墙体拆分次数与空洞数量,从根本上强化建筑结构整体性与多遇地震工况下的抗震性能。

(三) 管井统一构造与运维体系规划

完成竖向管井集约化组团布局之后,需要统一所有复合型管井组团的围护构造参数、检修设施规格、竖向防火分隔体系,并依托 BIM 数字化台账搭建全生命周期运维管控机制,实现设计、施工、运维一体化闭环管理。构造层面,同一类型管井组团采用统一厚度的围护墙体、同款规格的甲级防火检修门、标准化防火封堵材料,统一施工模板规格,减少建材采购品类,简化现场施工工序,有效降低土建施工成本;防火分隔层面,每层管井与楼板交接位置采用防火岩棉搭配膨胀防火密封胶进行密闭封堵,阻断烟气竖向蔓延通道,复合型组团内部不同子管井之间增设轻质防火隔墙,实现单一管井故障独立封闭,防止火灾、漏水事故在组团内部交叉扩散;运维层面,依托 BIM 模型录入所有管井组团的平面坐标、截面尺寸、墙体材质、耐火等级、检修周期、责任分管专业等全套参数,建立数字化动态运维台账,方便运维人员定期巡检、故障溯源、设备更新。同时在组团内部预留 10% ~ 15% 的冗余空间,适配后期管线扩容、设备迭代更新、老旧管道更换等升级需求,无需二次裁切、改造主体结构,全面提升竖向管井系统的适配性、灵活性与耐久性,完善建筑全生命周期集约化管控体系。

依托 BIM 精细化结构模型划定竖井布设红线、甄别结构高危受限区域,结合防火分区排烟需求优化竖井平面点位并动态微调截面形制,能够让防排烟竖井完美适配主体结构受力体系,从源头减少剪力墙拆除、梁柱裁切及后期结构加固

的工程量，平衡消防排烟刚需与结构安全底线；依托 BIM-Fluent 双向耦合仿真技术，完整还原火灾全阶段竖井内部高温烟气流动与热量传递规律，精准定位热量聚集的防护薄弱区域，针对性研发分层复合式防火隔热构造体系，多层结构协同阻隔高温余热渗透，有效解决高温烟气长期侵蚀周边承重构件、加速结构老化破损的行业难题；按照消防安全、电气隔离、结构适配、检修便捷的整合原则，将多类零散竖向功能性管井集成为三类标准化复合型组团，统一围护构造、防火分隔与检修标准，不仅能够节约建筑竖向闲置空间、提升整体空间利用率，还能减少墙体空洞数量，修复碎片化墙体结构，强化建筑整体抗震性能与结构完整性。

第三节 消防设备基础、检修通道与土建预留

在大型土木工程建筑消防集成设计体系中，固定式消防动力设备、控制设备是主动消防系统的动力核心，设备基础承载力、专用检修通行空间、土建预埋预留构造直接决定消防系统运行稳定性、设备使用寿命与后期运维检修效率。现阶段多数建筑工程依旧延续“土建先行、设备后置”的传统设计模式，土建结构浇筑完成后再开展消防设备选型、基础改造、洞口开凿作业，极易出现设备基础配筋不足无法承载设备动荷载、检修通道空间狭小不满足运维规范、现场后凿洞口切断结构受力钢筋等一系列工程通病。基于 BIM 数字化协同设计平台，联动结构、消防、设备安装多专业开展同步设计，依据消防设备荷载参数完成定制化基础配筋设计，统筹规划检修平台、操作通道与吊装洞口空间布局，集中统一全部预埋件与预留洞口三维定位，从设计源头规避现场二次开凿作业，在保障主体土建结构完整性与安全性的前提下，实现消防设备安装、日常运维、更换吊装全流程高效落地，完善消防设备与土建结构一体化集成设计体系。

一、基于设备荷载参数的 BIM 设备基础配筋协同设计

消防水泵、排烟风机、补风风机、消防控制柜、应急电源柜等核心消防设备区别于常规静态建筑设备，不仅具备自重静态荷载，设备启停、长期运行过程中还会产生周期性振动荷载、偏心冲击荷载，动荷载长期往复作用极易引发设备基础开裂、锚固螺栓脱落、底板不均匀沉降等病害。为此，需要依托 BIM 集成模型归集各类消防设备完整荷载参数，结合结构基础受力验算结果，针对性开展专

项基础形制设计与分层配筋作业，替代传统统一化基础设计模式，实现设备基础与土建底板、承台结构无缝适配。

（一）全域消防设备荷载参数归集与分类

消防设备基础配筋设计的前置条件是精准归集设备各项力学参数，常规设计仅参考设备空载自重开展基础设计，忽略动态振动荷载与附加集中荷载，导致基础安全冗余不足，无法适配设备长期服役工况。结合民用建筑与地下工程常用消防设备品类，可将设备划分为旋转动力类设备与静态控制类设备两大类别，两类设备荷载构成、受力特征、基础设计要求存在显著差异化特征。旋转动力类设备主要包含卧式 / 立式消防水泵、轴流排烟风机、离心补风风机、加压送风机，该类设备内部电机、叶轮高速运转，除设备本体自重之外，会产生持续性竖向振动荷载与水平侧向冲击荷载，也是基础开裂风险最高的设备类型；静态控制类设备涵盖消防控制柜、双电源应急配电柜、火灾报警主机、储能备用电源柜，此类设备无动态振动荷载，仅承受静态自重荷载与人员操作附加活荷载，基础设计难度相对较低。依托 BIM 设备专属族库，录入不同规格消防设备的空载自重、满载运行自重、额定振动频率、竖向振动幅值、水平偏心荷载等核心参数，同时结合设备安装位置，区分地下室柔性底板基础、地上楼层刚性楼板基础两大安装工况，为后续配筋计算提供精准的数据支撑。

（二）不同类型消防设备基础形制参数对照

为规范不同工况下消防设备基础设计标准，平衡结构配筋成本、设备减震性能与土建施工难度，结合海量工程实测数据与有限元受力验算结果，汇总主流消防设备基础形制尺寸、配筋规格、荷载取值、减震配套方案，形成标准化参数对照表，设计人员可直接依托 BIM 模型调取参数完成基础建模与配筋设计，大幅缩短设计周期，规避经验化设计造成的安全隐患。

设备类别	设备规格	静态自重 (kN)	动态附加荷载 系数	基础形制	基础尺寸 (长 × 宽 × 高 mm)	主筋配筋 规格	配套减震 措施
卧式消防水泵	低功率 (≤ 55kW)	15~35	1.25	整体现浇矩形基础	2500 × 1200 × 350	双向双层 Φ 12@150	橡胶阻尼 减震垫
卧式消防水泵	高功率(> 55kW)	35~80	1.40	带悬挑承台基础	3800 × 1800 × 450	双向双层 Φ 14@120	弹簧阻尼 减震器
立式消防水泵	全功率 通用	8~25	1.15	局部独立墩基础	1600 × 1600 × 400	双向双层 Φ 10@150	复合型减震基座

续表

设备类别	设备规格	静态自重 (kN)	动态附加荷载 系数	基础形制	基础尺寸 (长 × 宽 × 高 mm)	主筋配筋 规格	配套减震 措施
排烟 / 补风风机	轴流式常规风机	10~30	1.30	长条式现浇基础	2200 × 1000 × 300	双向单层 Φ 12@180	侧向限位 减震垫块
消防控制柜	单台标准柜体	2~8	1.05	条形简易混凝土基础	1200 × 600 × 200	双向单层 Φ 8@200	无需额外 减震
应急电源柜	多组并联柜体	10~20	1.10	一体式整板基础	3000 × 800 × 250	双向单层 Φ 10@180	底部防滑 减震胶垫

（三）BIM 一体化基础建模与配筋校核流程

完成荷载参数归集与基础参数选型后，依托 BIM 协同平台开展设备基础一体化建模、配筋布设、受力校核全流程作业，实现结构基础与消防设备高度适配。首先在集成模型内定位设备安装坐标，结合上表尺寸参数创建设备基础混凝土构件模型，同步调整基础标高，保证基础顶面高于完成地面 150mm ~ 300mm，有效规避地面积水浸泡设备底座，提升设备防潮防锈能力；其次进入配筋专项模块，按照既定主筋、分布筋规格与间距，完成底层主筋、上层分布筋、边角加固筋的精细化建模，针对大功率水泵、大型排烟风机等高振动设备，额外增设拉结箍筋，强化基础整体性，抑制振动形变；最后将基础模型与土建底板、承台结构进行耦合验算，叠加设备静态荷载、动态振动荷载、基础自重、地面活荷载四类工况，校核基础混凝土抗压强度、配筋抗拉强度、基础沉降差值。针对验算不合格区域，自动优化配筋间距或加厚基础垫层，同步联动调整周边土建结构，彻底解决传统设计中设备基础与主体结构脱节、配筋冗余不足等问题。

二、检修通道、操作平台与吊装洞口专项规划设计

消防设备全生命周期包含日常巡检、季度维保、故障检修、老化设备更换、报废吊装等多项运维作业，完备的通行通道、专属操作平台、标准化吊装洞口是保障运维工作落地的基础条件。传统设计普遍重设备安装、轻后期运维，过度压缩设备机房空间，导致设备夹缝无操作面、大型风机水泵无吊装通道、高层设备无法完成整体更换。基于 BIM 三维可视化模拟功能，以运维规范为底线、结构安全为红线，统筹规划层级化检修通道、专业化操作平台与多功能吊装洞口，平衡空间利用率与运维便捷性，实现消防设备安装与运维双向兼顾。

（一）分级式设备检修通行通道布局优化

结合消防设备机房空间特征与运维作业频次,将检修通道划分为主通行通道、设备侧向检修通道、背部夹缝检修通道三个等级,制定差异化宽度与净高标准。主通行通道作为机房人员主要疏散、巡检通道,适配多人并行、工具转运作业,参照消防运维规范,通道净宽不得小于 1200mm,净高统一不低于 2200mm;设备侧向检修通道主要用于设备阀门调试、仪表读数、日常清洁,针对水泵、风机两侧空余区域进行规划,净宽阈值控制在 800mm 以上;背部夹缝检修通道用于设备线路检修、后端固件维护,净宽最低不得小于 600mm。依托 BIM 模型开展通道模拟排布,自动检测通道与结构梁柱、预埋管线、配电柜的碰撞冲突,严禁为拓宽通道裁切承重构件,仅通过微调设备摆放角度、优化设备排布顺序释放空余空间。同时规避通道狭长死角,保证所有检修通道均可直通公共疏散走道,极端火灾工况下可作为运维人员应急逃生通道,兼具运维功能与安全避险功能。

（二）专业化设备操作平台结构设计

高层建筑设备层、地下夹层、屋面风机平台内的部分排烟风机、加压送风口、高位消防稳压设备安装高度较高,地面作业无法完成仪表调试、阀门启闭、滤芯更换等操作,必须配套固定式土建操作平台。操作平台隶属于附属土建结构,其支座、支撑立柱需要与主体楼板、剪力墙可靠锚固,禁止采用简易后置膨胀螺栓固定的临时平台。在 BIM 模型内根据设备操作高度,定制差异化平台形制:低位操作平台高度设置为 600mm ~ 1000mm,适配中小型控制柜、低位风机操作;高位悬挑平台高度可达 1500mm ~ 2500mm,适配屋面高空排烟设备。结构层面,平台主梁采用槽钢或小型工字钢,次梁采用矩形钢管,板面铺设防滑花纹钢板,平台外侧统一设置 1100mm 高防护栏杆与 150mm 高挡脚板;土建锚固层面,平台支撑立柱底部现浇混凝土锚固墩,与楼板钢筋同步绑扎浇筑,从结构层面保障平台承载力。同时在 BIM 中模拟人员集中作业荷载,校核平台挠度与锚固强度,杜绝高空作业坍塌风险。

（三）多功能吊装洞口预留与封改方案

大型卧式消防水泵、离心式排烟风机单体重量大、外形尺寸规整,无法通过常规人行通道转运至设备机房,需要在设备层楼板、竖向墙体预留专用吊装洞口,满足设备进场、后期报废吊装外运需求。吊装洞口规划阶段,依托 BIM 模型模拟设备转运全过程,规划最优转运路线,洞口位置优先布置在设备机房相邻楼板

闲置区域，避开核心受力主梁、剪力墙、密集配筋区域，最大限度降低对主体结构的扰动。洞口尺寸依据最大规格设备外轮廓尺寸外放 300mm ~ 500mm，预留操作冗余空间；洞口周边增设闭合加固圈梁，圈梁配筋规格不低于 $\Phi 12$ 双层双向钢筋，弥补楼板开孔造成的刚度损耗。设备吊装作业完成后，采用钢筋混凝土现浇封堵，封堵楼板配筋与原楼板配筋无缝搭接，同步做好防水、防火封堵处理。BIM 模型同步留存洞口原始尺寸、加固配筋、封堵方案全套资料，为后期二次吊装、结构验收提供完整依据。

三、土建预埋件与预留洞口集约化统一布设

消防系统土建预埋件主要包含设备锚固螺栓、管道预埋套管、支架预埋钢板；预留洞口涵盖管道穿墙洞口、线缆穿板洞口、设备通风散热洞口。预埋件与预留洞口是连接土建结构与消防设备管线的关键节点，分散化、无序化的预埋设计极易出现点位错位、规格不符、重复开孔等问题。依托 BIM 集成模型，整合全专业预埋预留需求，统一洞口与预埋件三维定位、规格参数、施工标准，实行集中化、清单化管理，全面取缔施工现场后凿作业，保护结构钢筋完整性。

（一）预埋件分类建模与标准化定位

按照功能属性将消防专用预埋件划分为设备锚固预埋件、管线配套预埋件、附属设施预埋件三大类别，建立标准化 BIM 族库。设备锚固预埋件包含水泵、风机底座专用预埋螺栓与预埋钢板，提前布置于设备基础内部，螺栓外露长度严格匹配设备底座安装孔位；管线配套预埋件涵盖穿墙防水套管、穿楼板密闭套管、侧向支架预埋钢板，适配全楼层消防管道敷设；附属设施预埋件用于检修平台栏杆、通道防护构件、吊装临时支架的锚固固定。所有预埋件以结构轴线、标高基准线为参照，标注精准三维坐标，统一录入 BIM 明细表，区分不同楼层、不同区域预埋件规格与数量，直接输出预埋施工图纸与材料清单，指导土建班组同步完成绑扎、浇筑作业。

（二）多类型预留洞口统筹避让设计

针对消防给排水管道、排烟风管、强弱电控制线缆、设备散热通风四类预留洞口，开展集约化统筹设计，严控洞口开孔范围与位置。设计过程中遵循三大基本原则：禁止在主梁中和轴、剪力墙加密区、预制构件全域开设任何洞口；大型风管、管道主洞口优先布置在次梁间隙、楼板低应力区域；同区域多类型洞口集

中排布，减少零散开孔对结构整体性的破坏。同时依托 BIM 碰撞检测功能，排查预留洞口与内部钢筋、预埋管线的干涉问题，优化洞口坐标，对于必须开设的大型洞口，同步配套钢筋补强、增设附加圈梁等加固措施，实现开孔与加固一体化设计。

（三）预埋预留清单化施工管控机制

为解决预埋预留施工阶段错埋、漏埋、偏移等质量通病，建立 BIM 清单化全过程管控机制。设计阶段汇总所有预埋件、预留洞口，生成标准化工程量清单、定位坐标清单、规格参数清单；施工交底阶段，利用三维模型替代传统二维图纸，对土建班组、消防安装班组进行可视化交底，明确预埋标高、轴线偏差允许范围；浇筑阶段实行“预埋复核签字制度”，每一处预埋件、预留洞口浇筑前，由结构、消防、监理三方人员联合复核坐标与规格；验收阶段依托 BIM 模型与现场实测点位进行比对验收，偏差超阈值立即整改。该管控机制从制度层面规范预埋预留作业，彻底取缔现场后凿作业，全方位保护土建结构安全。

依托 BIM 数字化平台归集各类消防动力与控制设备荷载参数，结合设备运行工况制定差异化基础形制与配筋方案，通过有限元耦合校核验证基础承载能力，可从源头解决设备基础开裂、不均匀沉降等运行病害；分级规划检修通行通道、定制专业化操作平台、预留多功能吊装洞口，能够兼顾设备日常巡检、故障维保与更换吊装的运维需求，同时规避盲目裁切承重结构的违规行为；集约化整合各类预埋件与预留洞口，实行标准化建模、统一化定位、清单化施工管控，有效减少施工现场二次开凿作业，降低结构破损风险与加固成本。该一体化预埋运维集成设计模式，补齐了消防设备基础与土建结构协同设计的短板，打通设计、施工、运维全流程壁垒，为现代化建筑消防设备精细化集成设计提供完备的技术支撑。

第四节 地下空间、隧道等特殊结构的消防集成案例

地下车库、城市综合管廊、市政交通隧道作为现阶段城市基建体系中的核心特殊地下土建结构，具备空间密闭性强、自然通风条件差、人员疏散路径单一、火灾烟气扩散可控性弱、结构抗火约束严苛等典型特征，其消防系统设计逻辑与地上常规建筑存在本质性差异。地上建筑可依托门窗、天井实现自然排烟与人员多向疏散，而地下密闭空间无天然排烟泄压通道，火灾发生后高温有毒烟气易快

速积聚且难以排出,极易造成人员窒息伤亡;同时地下结构多为钢筋混凝土厚板、密闭剪力墙、拱形衬砌结构,高温烟气长期滞留会加剧结构老化破损。结合多类典型地下工程 BIM 集成设计案例,剖析密闭地下空间消防设计特有难点,拆解消防、通风、土建结构一体化协同设计完整流程,总结标准化实操方案,为各类地下特殊结构消防集成设计提供可复制、可落地的实施范式。

一、地下特殊土建结构消防设计特有痛点与技术难点

地下工程受地质条件、覆土厚度、空间形态、围护结构形式多重因素制约,整体呈现封闭化、狭长化、集约化的空间特征,火灾发展规律、烟气扩散机理、人员疏散逻辑、结构受火损伤模式均区别于地上框架—剪力墙建筑。从消防减灾、结构防护、运维管理三个维度系统剖析地下车库、综合管廊、城市交通隧道三类主流地下结构的设计痛点,明确差异化设计重难点,是开展 BIM 一体化消防集成设计的基础前提。

(一) 密闭空间排烟系统设计难点

密闭性是地下土建结构最核心的属性,同时也是消防排烟设计最大的技术难点。常规地上建筑火灾烟气可通过外窗、幕墙缝隙、屋面天窗向室外自然泄压扩散,而地下车库、隧道、管廊被覆土岩层与密闭墙体全方位包裹,仅能依托机械排烟、补风系统实现烟气疏导,排烟效率完全依赖设备工况与风道布局。其中地下车库单层空间开阔、层高较低,火灾发生后汽车可燃物燃烧热释放速率高,烟气会快速覆盖整个楼层,易出现排烟风量不足、局部烟气涡流聚集、补风与排烟气流对冲等问题;城市车行隧道为狭长管状密闭空间,火灾烟气受气流风压影响单向蔓延,上游区域温度骤升、能见度归零,会直接阻断车辆与人员疏散路径;综合管廊内部空间狭小、管线密集,电力线缆、燃气管道火灾易引发连环爆炸,狭小空间内高温烟气泄压难度极大,常规排烟设备无法适配管廊狭窄截面,极易出现设备过载失效问题。与此同时,地下空间排烟竖井、补风井口布设受地面规划红线、市政道路布局限制,可布设点位有限,进一步加大排烟系统一体化设计难度。

(二) 狭长受限空间人员疏散瓶颈

人员疏散安全性是地下特殊结构消防设计的底线指标,相较于地上建筑多出口、多向疏散模式,地下工程普遍存在疏散路径单一、疏散出口数量稀缺、疏散竖向高差大、应急识别难度高的固有瓶颈。大型地下车库建筑面积大、功能分区

复杂,内部遮挡构件较多,火灾发生后能见度急速下降,被困人员极易迷失方向,且车库竖向疏散仅能依托楼梯间、竖向坡道,疏散效率远低于地上建筑;城市车行隧道狭长线性特征显著,疏散出口间距受土建造价、地质条件制约,出口间距普遍大于地上建筑,火灾工况下上下游车流拥堵,易引发群体性人员滞留事故;综合管廊内部仅设置小型专用检修疏散通道,通道宽度狭窄,仅适配运维人员单向通行,无法满足大规模人员疏散需求,且管廊内部可燃物复杂,火灾蔓延速度快,留给人员逃生的黄金时间极短。上述疏散短板无法通过单一消防设备优化解决,需要土建结构专业前置规划疏散节点、优化出口布局,实现结构与消防双向适配。

（三）地下结构抗火与耐久防护难点

地下特殊土建结构长期处于高湿度、高渗透压、低通风的服役环境,混凝土构件易出现碳化、钢筋锈蚀等常态化病害,火灾高温会进一步加剧结构损伤,其抗火防护难度远高于地上结构。从结构受力层面分析,地下车库底板、顶板、挡土墙主要承受土体侧向压力与地下水浮力,属于压弯复合型受力构件,高温烟气引发的温度应力易造成顶板裂缝扩张、挡土墙表层剥落;城市隧道拱形衬砌结构为整体承压结构,局部高温灼烧会破坏衬砌完整性,引发局部衬砌脱落,严重时会造成隧道拱顶失稳;综合管廊预制拼装结构由多段预制构件拼接而成,高温易导致拼接密封胶老化失效,破坏管廊整体防水体系,引发地下水渗漏、内部设备短路等次生病害。除此之外,地下结构火灾后人工检修难度大、加固施工空间受限,灾后修复成本远高于地上建筑,因此在设计阶段必须同步考量消防排烟与结构抗火双重需求。

二、典型地下工程 BIM 消防一体化集成设计案例解析

依托 BIM 全专业集成建模技术,分别选取大型地下综合体车库、双舱城市综合管廊、双向六车道车行隧道三类代表性地下工程作为实操案例,完整拆解土建结构、消防给排水系统、机械防排烟系统、强弱电控制系统的同步设计流程。通过三维模型碰撞校核、工况仿真模拟、多方案比选优化,解决各类地下结构排烟不畅、疏散困难、管线干涉、结构易损等痛点,形成适配不同地下工程的集成设计方案。

（一）大型地下综合体车库集成设计案例

本次案例选取某城市商业综合体地下两层车库工程,单层建筑面积 28600 m²,

包含小型汽车停车位 920 个，配套设备机房、疏散楼梯间、消防集水井等附属土建结构，属于典型大面积开阔型地下密闭空间。该项目初期二维设计阶段存在消防喷淋支管与次梁密集碰撞、排烟风道挤占疏散通道、风机基础配筋不足、集水井预留洞口偏移等多项问题。项目团队采用 BIM 一体化协同设计模式，首先搭建高精度土建结构模型，完整还原顶板梁板、剪力墙、底板承台、疏散坡道、设备机房全部构件；随后同步集成消防喷淋系统、消火栓管网、机械排烟系统、补风系统模型；通过全域碰撞检测，累计排查硬碰撞隐患 146 处、软碰撞隐患 89 处，重点优化吊顶密集区域消防管线分层排布模式，将大口径排烟风管布置于次梁间隙区域，小型喷淋支管依附梁侧敷设；针对车库大面积排烟难题，采用分区排烟模式，将车库划分为 12 个独立排烟单元，每个单元配套专属排烟风机与补风设备，依托 BIM 火灾仿真模拟，校验不同单元火灾工况下烟气沉降高度，微调风口朝向与风机启停逻辑；最后统筹设备基础、预埋套管、疏散通道布局，优化风机机房土建结构形制，增设专属检修平台，彻底解决前期设计弊病。项目落地后，排烟效率提升 27%，管线二次改造工程量减少 60%，实现结构、消防、运维三位一体的设计目标。

（二）双舱城市综合管廊集成设计案例

城市综合管廊为狭长封闭式预制拼装地下结构，本案例为城市主干道双舱综合管廊，总长度 1.8km，分为电力舱与水信舱两大独立舱体，电力舱布设高压线缆、通信线缆，水信舱集成消防水管、给水管道、污水管道，是城市地下基建的核心载体。管廊最大设计难点在于截面空间狭小，各类管线高度集中，消防灭火、烟气疏导、设备检修难度极大。在 BIM 集成设计过程中，采用分舱独立建模、整体统筹整合的作业模式，分别完成两个舱体预制衬砌结构模型、内部管线模型、消防超细水雾灭火系统、局部排烟系统模型搭建；结合管廊狭长空间火灾传播规律，利用 BIM-Fluent 耦合仿真，模拟电力舱线缆起火后的烟气扩散路径，取消传统大范围机械排烟方案，替换为分段式局部排烟模块，每间隔 150m 设置一组排烟风口，规避整体排烟造成的气流紊乱问题；管线排布层面，严格遵循“动力管线居中、消防管线靠边、检修通道预留中部”的原则，将消防超细水雾管道依附舱体侧壁预制支架敷设，不占用核心通行空间；同时统一预制舱体内部预埋件坐标，在预制工厂提前完成支架预埋、洞口预留，杜绝施工现场后凿作业。该方案有效适配狭小舱体空间特征，既保障消防灭火与排烟能力，又最大化预留检修

通道，适配管廊长期运维需求。

（三）市政车行隧道消防协同设计案例

本案例为城市双向六车道车行隧道，单洞长度 1250m，隧道净宽 14.5m，净高 5.2m，衬砌结构采用 C35 钢筋混凝土拱形现浇结构，主要服务小型汽车与轻型客车通行。隧道火灾主要风险为车辆自燃引发的大面积明火，高温烟气沿隧道纵向快速蔓延，直接阻断双向疏散通道。为解决狭长隧道排烟与疏散协同难题，依托 BIM 模型开展一体化优化设计：结构层面，前置规划应急疏散横通道，每隔 300m 设置一处双向疏散横通道，连通左右双洞隧道，横通道出入口采用加厚防火围护结构，耐火极限不低于 3h；消防系统层面，采用“纵向分段排烟+横通道补风”的复合型排烟模式，在隧道拱顶区域预留专用排烟风道，风道与拱形衬砌结构一体化浇筑成型，不额外占用通行空间；仿真优化层面，在 BIM 模型内模拟不同风速、不同起火点位下的烟气蔓延范围，精准匹配排烟风机风量与启停阈值，优化风口间距；管线层面，将消防消火栓主干管、喷淋配管依附隧道侧壁衬砌结构预埋，配套专用预埋支架，同步完成防晃加固处理。经多轮仿真校核，该方案可在 3min 内控制烟气沉降高度，保障人员安全穿越疏散横通道，圆满解决狭长隧道消防设计难题。

三、地下特殊结构消防集成标准化实操流程

结合三类典型地下工程实操案例，整合归纳适配地下车库、综合管廊、市政隧道的通用型 BIM 消防集成设计流程，划分为同步建模、分区碰撞校核、多维度仿真优化、施工方案固化四大核心阶段，明确各阶段作业内容、设计标准与优化原则，形成标准化、可复制的实操体系，规范地下特殊土建结构消防集成设计作业流程，降低设计门槛、减少设计失误。

（一）多专业同步分层建模阶段

同步建模是一体化集成设计的基础，作业过程中需统一全专业坐标系、构件精度、图层标准，实现土建与消防模型无缝融合。第一步完成土建主体结构建模，完整搭建地下工程围护结构、衬砌、梁板、疏散通道、设备机房、吊装洞口、预埋基础等全部土建构件，明确结构禁止开孔、禁止扰动的红线区域；第二步开展消防系统分层建模，依据防火分区划分结果，分别搭建防排烟系统、消防水系统、火灾报警控制系统、应急照明疏散系统子模型，结合地下空间形态微调管线与设

备形制；第三步完成附属设施建模，涵盖设备基础、检修平台、预埋套管、锚固支架等预埋构件，同步录入构件材质、荷载、耐火等级等属性参数；第四步开展模型整合归档，按照土建结构层、消防主管层、设备附属层进行图层分类，形成完整的全专业集成模型，为后续碰撞校核与仿真优化奠定基础。

（二）全域分区碰撞校核与隐患整改

相较于地上建筑，地下空间管线密集、结构改造容错率极低，碰撞校核需采用全域普查+分区精细化校核相结合的模式。全域普查阶段，依托 BIM 自动化碰撞检测工具，批量筛查所有消防管线、机电设备与土建承重结构、预制衬砌、钢筋骨架的硬碰撞、软碰撞及安全间距隐患，自动生成碰撞台账，标注隐患位置、风险等级、涉及专业；分区精细化校核阶段，针对设备机房、隧道拱顶、管廊舱体、车库吊顶等高危密集区域，人工剖切复核，重点核查排烟风道与疏散通道干涉、大型设备与基础结构错位、预埋洞口与钢筋冲突等隐蔽性问题；隐患整改阶段遵循“消防适配结构、小管避让大管、附属适配主体”的整改原则，优先微调消防管线走向与设备摆放位置，严禁裁切承重结构与隧道衬砌；特殊工况必须调整结构时，由结构专业完成受力验算与加固设计，多方会审通过后方可实施，形成闭环整改机制。

（三）火灾仿真与结构抗火双重优化

完成碰撞隐患整改后，依托 BIM 耦合仿真技术，同步开展火灾烟气仿真与结构抗火验算，实现消防功能与结构安全双向优化。烟气仿真层面，参照 ISO834 升温曲线，模拟不同可燃物起火工况，测算烟气蔓延速度、沉降高度、高温聚集区域，以此优化排烟风口、补风设备、喷淋喷头的布置位置与运行参数，规避烟气涡流、气流对冲等问题；结构抗火层面，提取高温聚集区域，校核衬砌、梁板、挡土墙等构件在长期高温作用下的强度折减率，针对性增设防火隔热构造、加厚防火保护层；疏散优化层面，结合烟气覆盖范围与人员疏散速度，核验疏散通道、应急出口、横通道间距是否满足规范阈值，优化应急照明、声光报警器的布设点位，补齐疏散体系短板，平衡排烟效率、结构抗火能力与人员疏散安全性。

（四）方案固化与施工交付落地

仿真优化完成后，进入方案固化与施工交付阶段，实现设计模型向施工现场精准转化。首先完成模型最终会审，组织土建、消防、暖通、施工、监理多方主体，对集成模型、优化方案、仿真数据进行联合审核，确认无误后冻结模型版本，禁

止后期无理由变更；其次输出成套交付资料，包含三维集成模型、二维施工图纸、预埋预留清单、设备基础配筋图纸、工程量明细表、仿真分析报告，全方位覆盖施工全流程需求；最后开展可视化技术交底，利用 BIM 三维动画演示管线排布、设备安装、预埋浇筑、排烟运行流程，替代传统二维图纸交底模式，降低施工人员理解偏差。同时将完整模型同步录入运维平台，为项目后期常态化消防运维、设备检修、结构监测提供数字化支撑。

密闭排烟困难、疏散路径单一、结构抗火能力薄弱是地下车库、综合管廊、城市隧道三类特殊土建结构共有的消防设计痛点，也是区别于地上常规建筑的核心设计难点。结合多项实际地下工程 BIM 集成设计案例，可明确不同地下空间适配的消防系统布局模式与结构优化策略，开阔型地下车库适配分区机械排烟体系，狭长管廊采用分段式局部灭火排烟方案，车行隧道推行排烟风道与衬砌一体化浇筑模式。依托同步分层建模、分区碰撞校核、火灾与结构双重仿真、方案固化交付四阶段标准化实操流程，能够系统性解决地下工程多专业分立设计、管线干涉、结构损伤、排烟疏散失衡等行业痛点，全方位提升地下特殊结构消防系统适配性、土建结构安全性与后期运维便捷性，为城市地下基建消防集成化、数字化设计提供标准化实施范式。

第八章 BIM 数据资产在土木工程运维中的消防价值延伸

第一节 设计－施工－运维阶段消防数据的资产化路径

数字化转型视域下，土木工程消防管理模式逐步从传统的人工台账管控、纸质资料存档模式，转变为以 BIM 数字模型为载体、数据资产为核心的全生命周期精细化管控模式。消防数据作为建筑专项运维数据的核心分支，涵盖防火结构构件、消防机电设备、防火分区参数、耐火设计指标、施工验收资料、运维检修记录等多维度信息，贯穿建筑设计、现场施工、竣工验收、后期运维报废全部阶段。基于此，本章立足于全生命周期管理视角，规范化梳理 BIM 消防数据分类标准，搭建跨阶段、跨参建主体的数据传递共享机制，统一数据存储与归档格式，构建标准化数字化消防资产库，推动零散消防数据向高价值、可复用、可流通的数据资产转化，深度挖掘 BIM 数据在消防风控、日常运维、应急救援领域的延伸价值。

一、BIM 全生命周期消防数据构件与参数分类体系构建

消防数据分类是实现数据资产化的前置基础与核心前提，科学、统一、适配全阶段的分类标准，能够明确不同类型消防数据的归集范围、采集标准、属性维度与适用场景，为后续数据传递、存储归档、资产入库提供统一执行依据。结合土木工程全生命周期作业特征，依托 BIM 模型构件化、参数化、信息化的核心优势，摒弃传统按专业粗放划分的老旧模式，结合消防构件功能属性、数据表现形式、阶段归属特征，搭建层级化、精细化、标准化的消防数据分类体系，覆盖建筑全域消防相关构件与参数信息，从根源上解决数据归类混乱、属性缺失、统计困难等行业痛点。

（一）防火结构构件静态基础数据

防火结构构件是建筑被动防火体系的核心载体，以土建结构构件为基础，通过防火构造优化、耐火材料加持形成具备防火隔烟、抵御高温、延缓火灾蔓延能

力的专用建筑构件,该类构件数据具备静态化、长周期、低变动的基本特征,自设计阶段定型后,全生命周期内基本不会发生参数变更,是 BIM 消防数据资产库的底层基础数据。此类数据依附 BIM 土建结构模型进行录入存储,完整收录构件几何参数、材质参数、耐火性能参数、施工工艺参数、验收检测参数五大核心板块内容,全方位记录防火结构构件的基础属性与服役性能。从构件覆盖范围层面分析,防火结构构件主要包含防火围护构件、防火分隔构件、竖向防火管井构件三大类别。其中防火围护构件涵盖耐火型剪力墙、防火楼板、屋面防火顶板、地下结构防火衬砌等主体承重附属构件,主要作用是抵御外部明火灼烧、阻隔高温烟气横向渗透,维系火灾工况下建筑结构整体稳定性;防火分隔构件包含防火隔墙、防火卷帘、防火墙、防火封堵板材、耐火密闭门窗等附属构件,核心功能是划分独立防火分区与防烟分区,阻断火灾与烟气在分区内部无序蔓延,降低大面积火灾事故发生概率;竖向防火管井构件囊括防排烟竖井、各类机电管井防火围护墙体、楼层防火封堵层,主要用于管控竖向管井火灾蔓延路径,规避烟囱效应引发的跨楼层火灾扩散隐患。

从数据归集维度层面分析,几何参数包含构件外形尺寸、空间坐标、标高范围、依附结构位置、构件搭接形式,所有参数以 BIM 模型基准坐标系为统一参照,保障多项目、多阶段数据互通兼容;材质参数明确混凝土强度等级、防火保护层厚度、耐火涂料型号、填充保温材料属性、钢材防火包覆材质;耐火性能参数作为核心管控指标,录入构件额定耐火极限、不同升温曲线下的强度折减阈值、耐高温最高极值、抗烟气腐蚀等级;施工工艺参数记录构件浇筑方式、防火涂料喷涂工艺、封堵施工流程、预埋件布设方案;验收检测参数存档第三方耐火检测报告编号、竣工验收评分、现场抽样检测数据、不合格项整改记录。完整的静态基础数据能够帮助运维人员快速掌握建筑被动防火体系整体性能,为火灾风险评估、老旧构件老化研判提供数据支撑。

（二）消防机电设备动态运行数据

区别于静态防火结构构件,喷淋系统、消火栓系统、防排烟系统、火灾自动报警系统等消防机电设备,内部集成电气元件、动力组件、传感模块,具备主动灭火、烟气疏导、火情探测、应急预警等功能,对应的设备数据以动态数据为主、静态参数为辅,数据更新频率高、变动维度多,是主动消防系统数据资产的核心组成部分,同时也是后期运维管控的重点内容。依托 BIM 设备专属族库,对消

防机电设备进行单品独立建档,实现一设备一档案,精准归集设备基础静态参数、实时运行动态数据、故障告警数据三类核心信息。静态基础参数与结构构件数据相互呼应,主要在设计与施工阶段完成一次性录入,涵盖设备出厂基础信息、安装施工信息两大模块。出厂信息包含设备生产厂家、产品型号、额定功率、工作压力、防护等级、出厂检测报告、质保年限、合规资质证书;安装施工信息包含设备安装坐标、安装标高、接驳管线规格、锚固基础参数、安装验收标准、隐蔽工程施工影像资料、调试验收数据。静态参数明确设备本体属性与安装基准,是设备资产管理、质保核验、配件更换的基础依据。动态运行数据主要产生于建筑正式运维阶段,由物联网传感设备、BIM 运维平台、消防主机同步采集更新,更新周期可根据设备重要等级设定为小时级、日级、周级。实时运行数据包含水泵启停状态、管网水压数值、风机运行转速、烟感温感探测器实时数值、防火门开闭状态、应急灯具续航参数;故障告警数据分为一般性故障与高危故障,一般性故障涵盖信号延迟、参数偏差、轻度损耗,高危故障包含设备停机、管网泄漏、电路短路、探测器失效,所有故障数据同步绑定故障发生时间、故障点位、初步故障诱因,自动上传至 BIM 数据资产库,辅助运维人员精准定位故障、制定维修方案。

（三）全周期复合型耐火管理参数

复合型耐火管理参数不属于单一构件或单一设备的附属属性,而是基于建筑整体防火体系衍生的综合性、关联性数据,覆盖防火分区划分、疏散体系参数、全阶段管理台账、合规性审查指标等内容,串联设计、施工、运维三大阶段,起到统筹整合静态构件数据与动态设备数据的作用,是衔接多类消防数据、实现资产化统筹管理的关键纽带。此类参数具备复合型、关联性、阶段性特征,需要多专业协同更新,适配全生命周期消防管控作业需求。防火分区与防烟分区参数是复合型参数的基础内容,包含分区边界坐标、分区建筑面积、分区耐火等级、配套分隔构件清单、专属消防设备配置清单、最大人员容纳阈值。在 BIM 模型中以独立图层进行划分,能够直观展示分区布局,同时联动调取分区内所有防火构件与消防设备数据,实现分区一体化管控;人员疏散体系参数涵盖疏散楼梯分布、应急通道宽度、安全出口数量、避难层参数、应急照明布设点位、最远疏散距离、模拟疏散时长,主要用于应急救援预案编制、火灾工况下疏散路径动态规划。

全阶段管理台账参数与合规性参数则聚焦管理层面,台账参数包含各阶段会

审记录、设计变更文件、施工整改记录、季度巡检台账、设备维保记录、零部件更换明细；合规性参数依据现行《建筑设计防火规范》《建筑防烟排烟系统技术标准》等国家规范，录入合规阈值红线，自动比对模型内构件耐火极限、设备运行参数、分区布局指标，筛查违规隐患，形成合规性审查报告。复合型耐火管理参数的归集完善，能够补齐单一数据维度的短板，构建全方位、多层次的 BIM 消防数据分类体系。

二、全流程跨主体消防数据协同传递机制搭建

完整且顺畅的数据传递链路是打破参建主体信息孤岛、实现消防数据资产化流转的必要条件。传统工程项目采用碎片化移交模式，设计单位仅交付二维施工图纸，消防 BIM 模型及附属参数数据不作为强制交付内容，导致施工阶段无法获取完整设计数据，运维阶段更是缺失前期设计、施工、验收全流程原始资料，数据断层问题直接制约消防数字化管理落地。为此，需以全生命周期数据流转路径为导向，明确设计、施工、运维三大阶段的数据移交内容、交付标准、责任主体、流转节点，搭建双向互通、闭环管控、权责清晰的消防数据协同传递机制，保障消防数据从设计源头到运维末期无损耗、无断层、无偏差传递。

（一）设计至施工阶段前置化数据移交模式

设计阶段作为消防数据产生的源头，其数据完整度、精准度直接决定后续施工安装质量与运维管控上限，该阶段数据移交需坚持前置化、完整化、精细化三大原则，摒弃竣工统一移交的滞后模式，将数据移交融入方案设计、施工图深化、设计变更全流程，分批次、分节点向施工单位完成数据交付。移交数据以高精度全专业 BIM 集成模型为载体，囊括前文所述防火结构构件静态数据、消防机电设备选型参数、复合型防火分区管理参数，同时配套附属二维图纸、计算书、合规性审查报告等辅助资料，实现模型数据与纸质资料双向对应。

在项目方案设计阶段，设计单位向施工总承包单位、消防专项安装单位交付初级版 BIM 消防模型，主要包含防火分区初步划分方案、核心防火构件布局、消防设备大致排布点位、竖向管井规划方案，方便施工单位提前编制专项施工方案，预判施工重难点、规划材料进场计划；在施工图深化阶段，交付定型版完整 BIM 模型，完成所有消防构件参数录入、设备族库绑定、碰撞校核优化，同步交付消防水力计算书、防排烟仿真报告、结构耐火验算文件，作为现场施工、预埋

预留、设备安装的直接依据；针对项目实施过程中的设计变更，实行变更即时移交制度，设计单位完成模型参数更新与图纸修改后，24 小时内同步推送至施工单位，同步标注变更部位、变更原因、参数调整明细，规避新旧数据混用引发的施工质量问题。

与此同时，建立双向反馈沟通机制，打破单向数据输送壁垒。施工单位结合现场地质条件、施工技术水平、模板模数，针对模型中不合理的构件参数、设备布局、预埋点位，及时向设计单位提交优化建议，由设计单位复核研判后完成模型迭代优化。该前置化双向移交模式，既能够保障设计数据完整下沉至施工一线，又能实现设计方案适配现场施工工况，从源头降低施工返工率，提升消防工程施工质量。

（二）施工至运维阶段竣工级数据闭环移交规范

施工阶段是消防数据丰富完善、动态更新的核心阶段，相较于设计阶段，施工阶段新增大量现场施工数据、隐蔽工程资料、设备调试数据、竣工验收数据，此类数据是后期运维阶段故障溯源、构件检修、设备更换、灾后修复的核心依据。施工至运维阶段的数据移交为项目最终竣工移交环节，需交付与施工现场 1:1 复刻的竣工版 BIM 消防模型，杜绝模型与现场脱节、参数与实物不符等常见问题，实现“实体建筑 + 数字模型”同步交付，为数据资产入库奠定基础。

竣工模型移交内容在设计模型基础上进行全方位补充升级，新增内容主要分为四大板块。第一，施工全过程动态资料，涵盖预埋预留施工影像、隐蔽工程验收记录、钢筋绑扎浇筑日志、防火构件施工交底文件、现场质量整改通知单；第二，设备安装调试数据，包含消防设备安装坐标微调记录、单机调试报告、系统联合调试数据、管网压力试压记录、报警系统联动测试结果；第三，竣工验收专项资料，覆盖消防专项验收报告、第三方检测机构耐火检测数据、监管部门抽检结果、竣工图纸会审文件；第四，备品备件资产数据，统计全域消防设备零配件型号、采购渠道、库存数量、质保到期时间，方便运维阶段备品备件统一管控。

移交流程层面，实行“三方联合审核、分级签字确认”制度，由施工单位提交竣工模型及全套附属数据资料，设计单位审核模型布局与原始设计方案的一致性，监理单位审核施工数据、验收资料的真实性与合规性，建设单位与运维单位进行最终终审，审核通过后正式完成数据移交。同时明确数据移交权责，若因施工单位数据漏填、错填引发后期运维事故，由施工单位承担对应责任，以此倒逼

参建单位重视竣工数据完善工作，保障移交数据的真实性、完整性与有效性。

（三）多参建主体数据共享与权限管控体系

大型土木建筑工程项目参建主体数量繁杂，除设计、施工、运维三方核心单位外，还包含监理单位、第三方检测机构、消防监管部门、设备供应商等辅助主体，不同主体的数据使用需求、操作权限存在明显差异。为兼顾数据共享效率与数据安全，在数据传递机制基础上，配套搭建分级权限管控体系，结合岗位职能划分访问权限、编辑权限、下载权限，实现数据按需共享、权限精准分配，在打通数据流通链路的同时，规避核心数据泄露、恶意篡改等安全风险。

权限层级整体划分为超级管理员、高级权限用户、普通权限用户、只读访客四大等级。超级管理员由建设单位专项负责人担任，拥有模型数据编辑、删除、移交、权限分配的全部权限，统筹管控全域消防数据资产；高级权限用户包含各专业设计师、施工技术负责人、运维主管，可编辑对应专业范围内的构件参数、上传台账资料、导出相关数据报表，无权限修改其他专业数据；普通权限用户涵盖现场施工员、基层运维人员、监理工程师，仅可新增运维检修记录、故障上报信息，无法修改基础构件与设备原始参数；只读访客包含消防监管部门、第三方检测机构、设备供应商，仅支持在线浏览模型、查询参数、查阅报表，禁止数据下载与编辑操作。

除此之外，平台自动留存所有用户操作日志，记录操作人员身份、操作时间、操作内容、IP 地址，实现数据操作全程可溯源。针对跨主体数据共享需求，采用临时授权模式，由申请方提交使用申请，管理员审核通过后开放限时权限，时效到期自动回收，从制度层面完善数据协同传递体系，适配多主体协同作业模式。

三、标准化消防数据存储格式与数字化资产库搭建

统一的数据存储格式与集约化资产库是数据资产沉淀、复用、长期留存的最终载体。当前行业内 BIM 建模软件品类繁多，不同软件原生数据格式互不兼容，且各参建单位数据归档标准参差不齐，PDF、CAD、RVT、Excel 等多类格式混杂存储，不仅增加数据整合难度，还极易出现数据丢失、格式损坏、版本错乱等问题。基于全生命周期消防数据特征，制定统一的分层存储格式，明确模型文件、附属资料、台账数据的归档标准，搭建集数据存储、智能检索、权限管控、版本迭代、复用共享于一体的数字化消防资产库，实现消防数据资产规范化、集约化、

长效化管理。

（一）多类型消防数据规范化存储标准

结合 BIM 消防数据的分类特征，将所有待入库数据划分为三维模型类、文档资料类、台账报表类三大类别，针对不同类别数据制定专属存储格式、压缩标准、命名规范与归档路径，统一全项目、全阶段的数据存储执行标准，彻底解决格式不兼容、归档混乱的行业痛点。标准化存储规则适用于所有参建主体，从数据生产源头规范输出形式，降低后期资产库整合成本。三维模型类数据为资产库核心载体，以 RVT 格式作为原生基础存储格式，适配主流 BIM 建模软件，用于完整留存构件参数、设备属性、空间坐标等核心信息；同时同步导出通用中间格式 IFC，该格式具备跨软件、跨平台兼容属性，不受建模软件版权限制，可实现不同运维平台之间的模型无缝流转，保障数据资产长期可读取、可复用；针对轻量化浏览、应急展示场景，导出 NWD 轻量化格式，降低模型内存占用，适配移动端、网页端快速浏览操作。模型文件命名严格遵循“项目名称-建筑楼层-专业类型-数据阶段-版本号”的统一规则，例如 XX 商业综合体-负一层-消防专业-施工阶段-V1.2，方便管理人员快速检索对应模型文件。文档资料类数据涵盖设计图纸、计算书、检测报告、验收文件、变更通知单等静态资料，统一采用 PDF 格式进行归档存储，禁止直接存储原始 CAD、Word 格式，规避文件编辑错乱、格式变形问题；对于施工影像、设备实拍视频等多媒体资料，图片统一存储为 JPG 高清格式、视频统一存储为 MP4 格式，并配套文字备注，标注拍摄时间、拍摄部位、资料用途；台账报表类数据包含巡检记录、维保台账、故障统计表、合规性分析报表，统一以加密 Excel 格式入库，固定报表字段、统计维度，便于资产库自动汇总分析、生成可视化图表。

（二）数字化消防资产库层级化架构设计

结合数据存储标准与全生命周期流转逻辑，采用分层架构模式搭建数字化消防资产库，整体分为数据采集层、格式处理层、分类存储层、功能应用层四大层级，各层级各司其职、逐级联动，形成完整的数据资产运营闭环。层级化架构设计能够实现数据精细化分类存储，同时拆解资产库运行逻辑，降低后期运维升级难度，适配大中型土木工程建筑海量消防数据的存储与管理需求。数据采集层为架构底层，主要负责全域消防数据的自动归集与手动上传，采集来源包含 BIM 设计施工模型、物联网传感终端、消防主机控制系统、人工运维台账、第三方检测平台，

自动采集动态设备运行数据与分区参数，人工补充施工影像、验收报告等静态资料，实现全维度数据一键归集；格式处理层依托内置格式转换插件，自动将非标准格式数据转化为既定入库格式，同步完成数据去重、纠错、脱敏处理，剔除无效冗余数据、屏蔽涉密隐私信息，保障入库数据质量；分类存储层按照建筑楼层、防火分区、数据类型、所属阶段四大维度，建立多级文件夹目录，对处理完成的数据进行分类归档，实现数据结构化存储；功能应用层面向所有授权用户，开放模型浏览、参数检索、报表导出、合规预警、版本比对、数据复用六大核心功能，满足不同岗位人员的使用需求。

（三）资产库迭代更新与数据复用机制

数字化消防资产库并非静态存档仓库，需要结合建筑服役状态、消防设备损耗情况、设计变更内容进行常态化迭代更新，同时配套标准化的数据复用机制，最大化挖掘数据资产价值，实现一次采集、多次复用、全域共享。结合消防数据更新周期，制定差异化更新方案：静态防火构件数据若无设计变更，实行年度复核更新制度，每年年末核验构件完好度与参数一致性；消防机电设备动态运行数据实行实时同步更新，故障数据、运行参数变动即时上传；复合型管理参数与台账数据实行月度更新，同步更新巡检记录、分区调整信息、合规性审查结果。每次更新完成后自动生成新版本文件，留存历史版本备份，支持版本回溯比对，规避更新失误造成的数据丢失问题。在数据复用层面，针对新建同类工程项目，资产库可输出标准化防火构件族库、消防设备参数模板、分区划分参考方案、台账报表模板，大幅缩短新项目设计建模、参数录入的工作周期；在运维管理层面，复用历史故障数据、维修方案台账，辅助快速处置同类设备故障；在监管审查层面，一键调取全生命周期消防资料，简化消防专项验收、常态化监管的审查流程。同时搭建行业级数据共享池，在脱敏处理的前提下，归集多项目优质消防数据资产，为行业规范优化、数字化消防体系研发提供数据支撑，充分释放 BIM 消防数据资产的延伸价值。

通过划分防火结构构件静态数据、消防机电设备动态数据、复合型耐火管理参数三大类别，可搭建适配全生命周期的 BIM 消防数据分类标准，从根本上解决消防数据归类混乱、属性缺失的问题；依托设计前置移交、竣工闭环交付、多级权限共享的协同传递机制，能够打通设计、施工、运维三方数据壁垒，实现消防数据无损耗跨阶段流转；统一多类型数据存储格式，搭建四层架构数字化消防

资产库，并配套常态化迭代更新与多场景复用机制，可完成零散消防数据向标准化、高价值数据资产的转化。该套完整的资产化实施路径，补齐了现阶段土木工程消防数字化管理的短板，为 BIM 消防数据长效化沉淀、产业化复用提供标准化执行范式，全面提升现代建筑全生命周期消防管控数字化水平。

第二节 基于 BIM 的消防设施全生命周期管理

消防设施是建筑主动防火、被动控火、应急疏散体系的核心组成单元，设施运行状态直接决定建筑火灾抵御能力与人员安全保障水平。传统消防设施管理模式以纸质台账、人工定期巡检为主，存在设备台账分散、故障定位滞后、检修标准不统一、资料调取繁琐、巡检管控流于形式等诸多弊端，极易出现设备超期服役、隐性故障无法及时排查、检修责任无法落实到人等安全隐患。依托 BIM 数字化模型参数化、可视化、构件化的核心优势，将消防设备检修周期、更换年限、维保标准等运维属性深度绑定至 BIM 构件之中，依托三维空间定位能力快速锁定故障设备并调取全套运维资料，联动数字化台账实现巡检、维保、报修、更换全流程数字化管控，构建覆盖设备进场安装、日常巡检、故障维修、老化更换、报废退场的全生命周期管理体系，全方位提升土木工程消防设施运维管理效率与风控能力。

一、BIM 模型消防设施运维属性体系录入与标准化建档

完善的运维属性档案是实现消防设施全生命周期数字化管控的基础，区别于设计阶段仅收录基础几何与安装参数的简易模型，运维专用 BIM 模型需要新增运维周期、维保工艺、损耗阈值、报废标准等专项运维属性，为后续智能化巡检、到期预警、故障研判提供数据支撑。通过规范化建档流程，对喷淋系统、防排烟系统、防火分隔设施、火灾报警系统、应急疏散设施全域消防构件进行独立建档，细化属性录入字段，统一建档标准，实现每一台消防设备、每一处防火构件均可溯源、可管控、可预警。

（一）消防设施基础运维字段分类设定

结合不同类型消防设施的服役特征与运维需求，参考国家消防设施维保相关规范条文，针对喷淋、风机、防火门、消火栓、探测器、应急灯具等主流设施，

差异化设定基础信息、周期管控、维保工艺、报废判定四大类运维属性字段，摒弃一刀切的简易录入模式，精准匹配各类设施的运维管控要求。所有属性字段分为固定静态字段与动态更新字段，固定字段仅需建档阶段一次性录入，动态字段随运维作业进度实时更新，兼顾建档效率与管控精度。基础信息字段为所有消防设施通用属性，包含设备编号、设备名称、所属防火分区、安装坐标、生产厂家、出厂日期、安装竣工日期、质保期限、适配配件型号、对接责任人，设备编号采用唯一编码制度，编码规则结合楼层、分区、设备类型编制，作为单台设备的专属身份标识，实现全域设备统一编码管控；周期管控字段为核心预警字段，主要录入常规巡检周期、深度维保周期、易损零部件更换周期、设备整体使用年限、预计报废日期，例如常规喷淋喷头巡检周期设定为每月 1 次，整体更换使用年限设定为 6 至 8 年，排烟风机深度维保周期为每季度 1 次；维保工艺字段收录标准化作业内容，包含日常巡检项目、专项维保流程、清洁养护工艺、零部件拆装步骤、常规故障处置方案；报废判定字段明确设备报废阈值、老化损伤判定标准、报废审批流程，为老旧设备淘汰更新提供量化依据。

（二）多品类消防设施差异化属性录入细则

为保障运维属性录入的规范性与精准性，结合消防设施功能分类，制定差异化录入细则，明确不同品类设施的周期参数、维保侧重点，规避参数录入同质化、脱离实际运维场景等问题。主动灭火类设施作为高危重点管控对象，涵盖喷淋系统、消火栓系统、气体灭火装置，除通用字段外，额外录入管网压力阈值、阀门启闭状态、灭火剂有效期、管道锈蚀预警阈值，重点管控管网渗漏、压力不足、灭火剂失效等常见故障；动力通风类设施包含排烟风机、加压送风机、补风机组，增设振动荷载阈值、电机温度上限、轴承润滑周期、叶片损耗标准，聚焦设备振动异响、电机过热、轴承老化等动力类病害；被动防火分隔类设施囊括防火门、防火卷帘、防火墙封堵构件，录入启闭灵活度阈值、密封胶老化周期、五金配件更换年限，重点排查密闭失效、启闭卡顿、防火封堵破损等隐患；智能探测与疏散类设施包含烟感探测器、应急指示灯、声光报警器，新增灵敏度校准周期、电池续航年限、信号传输延迟阈值，保障火情探测与应急疏散功能正常运行。

（三）单设备独立档案与模型构件绑定机制

在完成属性字段设定与参数录入后，建立“构件－编码－档案”三位一体的绑定机制，将独立运维档案与 BIM 模型内对应消防设施构件深度绑定，彻底解

决传统模式下台账与实物脱节、档案查找困难的痛点。技术层面依托 BIM 二次开发插件，以设备专属唯一编码为关联纽带，在模型构件属性面板内嵌档案访问入口，管理人员点击任意消防设备构件，即可直接调取该设备完整档案，涵盖基础参数、运维周期、历史维保记录、故障明细、配套施工图纸、零配件采购渠道等全套资料。同时档案与模型双向联动，档案内参数更新可同步至模型属性面板，模型内设备状态变更也会自动更新运维台账，实现模型与档案数据实时同步。此外，所有档案自动同步备份至数字化消防资产库，防止局部数据丢失，筑牢设施建档的数据安全防线。

二、基于三维可视化模型的故障设备定位与快速处置

传统消防设施故障处置模式流程繁琐，故障上报仅标注楼层与大致区域，无法精准定位故障点位，同时维修人员无法提前掌握设备参数、施工结构、适配维修方案，需现场反复勘测研判，大幅延长故障处置时长。依托 BIM 三维可视化空间定位技术，结合分层剖切、分区筛选、高亮预警功能，能够快速锁定故障消防设施精准坐标，一键调取构件耐火参数、全套施工图纸、历史维修方案与标准化维保工艺，简化故障研判、方案制定、现场维修全流程，提升故障处置效率，降低故障停运带来的火灾安全隐患。

（一）多层级故障智能定位与可视化预警

结合故障上报来源与风险等级，搭建全局筛选、楼层定位、分区锁定、构件高亮四级故障定位体系，适配不同故障类型与管控场景。全局筛选适用于批量故障排查，管理人员可通过设备类型、故障等级、上报时间、所属分区多维度筛选全域故障设备，自动生成故障分布热力图，直观展示建筑消防设施整体故障分布特征；楼层定位依托 BIM 模型分层显示功能，隐藏无关楼层构件，直接跳转至故障设备所属楼层，缩小排查范围；分区锁定以防火分区、防烟分区为单元，筛选对应分区内所有异常设备，适配区域性消防隐患排查作业；构件高亮为精准定位手段，针对单台高危故障设备，模型自动高亮对应构件、闪烁预警，同时弹窗展示故障类型、告警时间、风险等级、基础参数，让维修人员无需现场勘测即可精准掌握故障点位与基础故障信息。

（二）全维度附属资料一键调取服务

故障精准定位仅为处置工作的基础，完备的附属资料能够帮助维修人员制定

最优维修方案，缩短故障研判时长。基于绑定的独立设备档案，BIM 模型支持一键调取四大类附属资料：其一为构件本体耐火与运行参数，包含设备额定运行参数、允许偏差阈值、耐高温极限、易损零部件损耗标准，用于研判故障诱因，区分参数偏差、零部件老化、设备本体损坏等不同故障类型；其二为全套施工类图纸，涵盖设备安装详图、管线接驳图纸、基础配筋图纸、预埋预留节点详图，方便维修人员掌握设备安装结构，规避拆装作业中损坏周边管线与土建构件；其三为历史运维资料，包含该设备过往故障记录、维修方案、零部件更换明细、维保整改记录，复用成熟处置方案，降低维修试错成本；其四为标准化作业指导书，针对常见故障内置规范化拆装流程、养护工艺、调试标准，统一现场维修作业规范。

（三）分级分类故障闭环处置流程

为规范故障处置作业，结合故障风险等级，将消防设施故障划分为一般故障、重要故障、高危故障三个等级，制定差异化闭环处置流程，实现故障上报、派单、维修、核验、归档全流程数字化管控。一般故障涵盖指示灯亮度不足、探测器灵敏度轻微偏差、防火门启闭卡顿等低风险问题，系统自动下发维保提醒，由基层运维人员在 48 小时内完成自主维修，维修完成后上传现场影像，管理员线上审核归档；重要故障包含管网轻微泄漏、风机启停异常、卷帘升降故障等影响局部防火能力的问题，系统自动向运维主管推送派单任务，要求 24 小时内完成故障修复，同步更新维修台账；高危故障指喷淋系统大面积失压、排烟风机停机、报警主机失灵等直接威胁建筑消防安全的故障，平台立即触发红色预警，同步推送至监管部门与管理人员，启动应急处置预案，限时 2 小时内完成紧急抢修，无法及时修复的设备需增设临时消防设施，规避火灾风险。

三、BIM 模型与运维台账联动的数字化巡检管控

定期巡检是消防设施常态化运维管理的核心环节，也是排查隐性安全隐患、延缓设备老化、延长设施服役年限的关键手段。传统人工巡检模式存在巡检路线无序、漏检错检频发、台账填写繁琐、巡检结果无法量化分析、责任无法追溯等诸多弊端。通过实现 BIM 三维模型与数字化运维台账深度联动，自动生成智能巡检计划、规划最优巡检路线、线上填报巡检台账、自动统计分析巡检数据，同时绑定巡检人员岗位职责，构建计划生成－现场巡检－台账录入－隐患上报－数据复盘的一体化数字化巡检管控体系，从制度与技术双重层面规范巡检作业。

（一）智能巡检计划自动编制与派发

依托模型内录入的巡检周期、维保等级、设备重要程度等属性，BIM 运维平台可自动编制日度、月度、季度、年度多层次智能巡检计划，替代人工经验排期模式，保障巡检作业全覆盖、无遗漏。平台按照防火分区划分基础巡检单元，结合不同设备的巡检频次要求，整合合同区域内所有待巡检设备，统筹编制单元巡检清单，清单内明确巡检设备名称、专属编码、巡检项目、作业标准、允许偏差阈值、完成时限、对应负责人。针对重点机房、高危防火分区、老旧设备集中区域，适当加密巡检频次，增加专项深度巡检项目。计划编制完成后，自动派发至对应巡检人员移动端账号，同步推送消息提醒，明确巡检作业任务与考核标准，倒逼巡检人员按期完成作业。

（二）最优巡检路线规划与移动端现场作业

为降低巡检人员无效动线、提升巡检作业效率，平台结合 BIM 模型空间布局，基于遗传算法自动规划最优巡检路线，统筹规避楼层绕行死角、重复巡检路段，按照距离最短、分区集中、高低优先级适配的原则，串联所有待巡检设备点位。巡检人员依托移动端 APP，调取三维轻量化模型与巡检路线导航，按照既定路线完成现场作业；作业过程中可直接在移动端完成台账填报、隐患拍照上传、异常数据标注，无需事后二次纸质录入，实现巡检作业无纸化。同时平台内置定位打卡功能，巡检人员需在设备对应点位完成打卡操作，有效杜绝代检、漏检、虚假巡检等违规行为，从根本上解决传统巡检模式的管理乱象。

（三）台账联动更新与巡检数据量化复盘

数字化运维台账与 BIM 模型、移动端巡检数据实时双向联动，巡检人员移动端填报的数据会自动同步至模型档案与资产库台账之中，自动分类汇总巡检完成率、设备异常率、故障类型分布、隐患整改进度等核心数据，生成月度、季度巡检分析报表。管理人员可依托报表数据，量化复盘巡检作业质量，研判全域消防设施整体老化趋势、高频故障点位与故障诱因，针对性调整后续巡检计划、优化维保资源配置；同时台账永久留存至数字化消防资产库，实现巡检数据全生命周期可溯源，可作为消防监管审查、项目运维考核、设施报废审批的核心依据。此外，平台具备数据预警功能，针对多次巡检反复出现的同类隐性隐患，自动推送专项预警，提醒管理人员开展深度专项维保，实现被动处置向主动预判的管理模式升级。

通过完善 BIM 模型消防设施四大类运维属性字段，制定差异化录入细则并完成设备独立建档绑定，能够构建标准化消防设施运维档案体系，补齐传统模型运维属性缺失的短板；依托四级可视化定位体系、一体化资料调取服务与分级故障处置流程，可大幅缩短故障定位、方案研判、现场维修的整体时长，提升故障处置效率；联动 BIM 模型与数字化运维台账，实现巡检计划智能编制、路线自动规划、现场无纸化作业、数据量化复盘，全方位规范定期巡检作业流程，杜绝虚假巡检、漏检等违规问题。该全生命周期管理模式打通 BIM 数字化技术与消防运维管理的融合壁垒，优化消防设施巡检、维保、报修、报废全链条管控模式，有效降低土木工程消防设施运行安全隐患，显著提升建筑消防运维数字化、精细化管理水平。

第三节 城市信息模型（CIM）中的消防基础设施数据

数字城市与新型智慧城市建设进程持续加快，CIM 城市信息模型逐步成为统筹城市空间资源、基础设施、公共安全资源的核心底层载体，其以三维地理信息数据为基底，集成全域城市基础设施、地理地貌、人文资源、建筑模型等多源数据，实现从单体建筑向片区、城区、全域城市尺度的数字化复刻。为完善城乡一体化消防安全治理体系，本节系统性梳理 CIM 平台下辖各类全域消防基础设施数据，打通单体建筑 BIM 消防数据与城市 CIM 平台的数据交互通道，依托海量全域消防数据研判片区消防承载能力，以此指导城市更新、乡村基建配套中的消防专项规划，全方位提升城乡公共消防安全治理现代化水平。

一、CIM 平台全域消防基础设施数据分类与归集体系

城市消防基础设施具备覆盖范围广、分布点位散、归属部门多、数据类型杂的基本特征，涵盖市政消防供水设施、应急救援站点、交通疏散通道、老旧街区消防配套、特殊构筑物防火设施等多元化内容。CIM 平台依托 GIS 地理信息底层架构，结合多源数据融合技术，打破消防救援、市政水务、住建、交通、城管多部门的数据壁垒，按照设施服务属性、空间尺度、数据类型搭建标准化的数据归集分类体系，明确各类消防基础设施的数据采集标准、录入字段、存储形式，为后续跨层级数据融合与承载力分析奠定坚实的数据基础。

（一）市政消防供水设施基础数据

市政消防供水设施是城市公共消防救援体系的基础性保障设施，主要承担火灾事故发生时外部补水、应急灭火供水的核心职能，覆盖城市建成区所有市政道路、居民区、商业区、工业园区、乡村主干道，是 CIM 消防数据体系中覆盖范围最广、使用频次最高的基础设施类别。该类设施依附城市市政管网系统布设，整体包含室外市政消火栓、消防取水码头、专用消防蓄水池、市政供水主干管网、分区调压阀门、应急补水泵站六大核心设施，所有设施数据以地理坐标为核心索引，绑定三维空间位置、运行参数、维保台账、服务半径等多元化属性，实现全域供水设施一张图数字化管控。

在数据归集维度层面，市政消火栓作为核心管控单元，需完整录入空间属性、运行属性、运维属性三类核心数据。空间属性包含经纬度坐标、所属行政片区、隶属道路名称、埋地标高、地面露出高度、服务覆盖半径；运行属性涵盖管网常态供水压力、峰值供水阈值、接驳主管管径、供水水源类型、冬季防冻等级；运维属性包含设施出厂编号、安装竣工时间、责任管护单位、季度试压检测数据、故障维修记录、零部件更换明细。消防蓄水池与取水码头额外录入有效蓄水容积、最低警戒水位、枯水期补水能力、适配消防车取水类型；市政供水管网则录入管网敷设走向、管材材质、服役年限、管网老化系数、阀门启闭状态，便于平台精准研判供水系统薄弱区域。

从 CIM 平台管控逻辑分析，平台以城市行政街区为基础单元，将所有供水设施图层与城市路网图层、建筑集群图层进行叠加耦合，自动测算每一处消火栓的实际覆盖范围，筛查高层建筑密集区、老旧街巷、城郊乡村等供水盲区，同步标注供水压力不足、设施超期服役、管网老化破损的高危区域。同时联动气象监测数据，针对严寒、洪涝、干旱等极端天气，预判供水设施运行隐患，为市政供水设施常态化维保、新增点位规划、老旧管网改造提供量化数据支撑，夯实城市消防供水安全底线。

（二）消防救援站点与交通疏散配套数据

消防救援站点与应急交通疏散体系直接决定城市火灾事故的应急处置效率，火灾救援黄金时间内的出警距离、通行效率、救援物资储备量，直接影响大型火灾、连片火灾的灾害控制效果，是 CIM 宏观消防风控分析的核心研判指标。此类数据区别于静态基础设施数据，兼具静态空间参数与动态通行参数，主要包含

各级消防救援站、微型应急消防站、应急物资储备库、城市隧道、城市主次干道、应急疏散专用通道、消防车禁行路段等相关数据，能够全方位支撑救援路径规划、出警时长测算、应急资源调度等高层级应用场景。

消防救援站点数据按照行政等级划分为市级专职消防站、区级标准消防站、街道微型消防站、社区应急服务点四个层级，数据字段包含站点地理坐标、管辖辐射范围、站内消防人员编制、主战消防车配置数量、特种救援设备品类、灭火物资储备总量、专职值班时长、常态化出警记录。CIM平台可结合各站点管辖范围，自动划分救援责任片区，规避管辖重叠、管控盲区等问题；同时结合历年火灾出警数据，分析高频火灾事发区域与救援站点的匹配度，研判现有站点布局的合理性，为新增消防站选址、老旧站点扩容升级提供数据参考。

城市交通与隧道设施数据是保障消防救援车辆快速通行的关键，其中城市隧道作为特殊密闭交通构筑物，内部车流密集、疏散难度大、火灾蔓延速度快，属于城市高风险消防单元，需单独归集专项防火数据，涵盖隧道长宽尺寸、通风排烟系统参数、防火分区划分、应急逃生通道布设、火灾探测设备分布、隧道限速标准、高峰时段拥堵数据；城市路网数据收录道路宽度、通行限高限重、单向通行规则、红绿灯分布、施工封堵路段、老旧狭窄街巷分布，平台依托路网数据，结合实时车流信息，利用遗传算法动态规划最优救援路线，规避拥堵路段与禁行区域，最大限度缩短救援通行时长，提升应急救援效率。

（三）老旧街区与乡村片区复合型消防数据

老旧城区、历史保护街区、城郊乡村片区是现阶段城乡消防安全治理的重难点区域，此类区域普遍存在建筑密度过大、耐火等级偏低、消防通道狭窄、供水设施缺失、居民消防意识薄弱等共性问题，火灾风险远高于现代化新建城区。该类区域消防数据具备复合型、碎片化、差异化特征，不仅包含硬性消防设施参数，还涵盖建筑集群属性、人口分布特征、区域人文属性等软性数据，是CIM平台实现精细化城乡消防治理不可或缺的数据内容。

为直观区分不同城市片区消防配套现状，明确各类区域消防短板，下面通过表格形式，对比新建城区、老旧街区、乡村片区三大区域的消防基础设施配置差异、火灾风险特征及数据采集侧重点，为CIM平台差异化管控提供参考依据。

区域类型	建筑基础特征	消防供水配套	救援交通条件	主要火灾风险	数据采集侧重点
现代化新建城区	多为高层、超高层框架剪力墙建筑，建筑排布规整，整体耐火等级一级 / 二级	市政消防栓全覆盖，管网压力稳定，配套专用消防蓄水池，供水冗余充足	主干道宽度 $\geq 12\text{m}$ ，配套环形消防车道，无通行限制，救援通达性极强	高层建筑竖向火灾蔓延、机电设备起火、人员疏散拥堵	建筑 BIM 消防数据、管网动态压力、高层疏散参数、排烟设施性能
城市老旧街区	多层砖混结构为主，楼栋间距狭小，违章搭建较多，耐火等级普遍三级及以下	消防栓分布稀疏，部分街巷无供水设施，老旧管网锈蚀严重，供水压力波动较大	内部街巷宽度 3—5m，消防车无法直达楼栋门口，仅靠人力搬运救援设备	连片木质构件起火、老旧电气线路短路、易燃杂物堆积引发集群火灾	街巷通行宽度、老旧管网服役年限、违章建筑分布、可燃杂物聚集点位
城郊乡村片区	自建房集群为主，建筑设计无统一防火标准，建材混杂，防火分隔缺失	市政管网覆盖率低，主要依靠天然水源与简易蓄水池，应急供水能力薄弱	村级道路狭窄弯曲，部分支路未硬化，雨雪天气救援车辆无法通行	民居柴火堆积起火、冬季取暖明火隐患、偏远区域救援滞后	天然水源分布、村级道路参数、自建房耐火等级、居民聚居密度

结合上表差异化特征，CIM 平台针对老旧街区重点采集老旧砖混建筑耐火参数、狭窄街巷通行数据、违章搭建分布、老旧供水管网损耗数据；针对乡村片区归集自建房集群分布、天然消防水源、村级道路、明火隐患点位等专项数据。同时叠加人口密度、昼夜人员分布、可燃物荷载等辅助数据，全方位研判老旧街区与乡村片区火灾风险等级，补齐城乡消防治理短板，推动消防资源均衡化配置。

二、BIM-CIM 双向融合的城乡一体化消防数字底座构建

单体建筑 BIM 消防数据与城市级 CIM 平台的数据融合，是打通微观建筑消防管控与宏观城市消防治理的核心纽带。传统消防数据体系存在尺度割裂问题，BIM 仅能服务单栋建筑内部运维，无法对接城市应急调度体系；CIM 缺少建筑内部精细化消防构件、设备运维数据，仅能实现宏观层面粗放式管控。基于统一的数据交互协议、适配的模型轻量化算法、分层级的数据接入标准，完成 BIM 消防数据向上归集、CIM 宏观数据向下下发，构建多尺度、一体化、全覆盖的城乡消防数字底座，实现建筑内部风控与城市全域应急治理深度联动。

（一）多尺度数据统一接入标准制定

BIM 与 CIM 分属不同空间尺度、不同技术架构的数字化平台，二者底层坐标系、模型精度、数据格式、参数字段存在显著差异，若无统一接入标准，极易出现模型变形、数据错乱、参数丢失、层级混乱等问题，无法实现数据互联互通。为此，需从空间坐标系、模型精度等级、数据传输格式三个维度，制定 BIM 消防数据接入 CIM 平台的统一执行标准，消除跨尺度数据融合的技术壁垒，保障数据接入的完整性、精准性与兼容性。空间坐标系层面，统一采用国家 2000 大地坐标系作为全域基准坐标系，所有单体建筑 BIM 模型完成坐标转换校准，摒弃项目局部自定义坐标系，实现建筑模型、市政设施、地理地貌三者坐标一一对应，从空间层面完成多源数据耦合匹配；模型精度层面，按照 LOD 多细节层级划分接入标准，LOD1 层级仅上传建筑外轮廓与防火分区整体布局，用于城市宏观风控分析；LOD2 层级上传消防竖向管井、大型防火分隔构件、主干消防管网；LOD3 层级上传喷淋、消火栓、探测器等全部机电设备及完整运维属性，适配精细化应急救援场景；数据格式层面，以 IFC 通用中间格式作为 BIM 数据传输载体，以 GeoJSON 格式作为 CIM 地理数据交互格式，两类格式互为补充，兼顾模型完整性与平台兼容性。

（二）BIM 消防数据分层上传与轻量化处理

完整的高精度 BIM 消防模型数据体量庞大，直接批量上传至 CIM 平台会造成平台服务器运算负荷过高、页面加载卡顿、资源冗余浪费等问题，因此需采用分层上传 + 轻量化处理的双重模式，按需完成数据归集，平衡模型精度与平台运行效率。结合消防治理应用场景，将上传数据划分为基础层、设施层、运维层三个层级，分层完成数据上传与同步更新，适配不同岗位、不同场景的使用需求。基础层数据为必上传固定数据，包含建筑外轮廓、楼层标高、防火分区划分、疏散通道布局、被动防火构件基础参数，该层级数据体量大、稳定性强，完成一次性上传后无需频繁更新；设施层数据为主动消防设备静态参数，涵盖喷淋系统、防排烟系统、火灾报警系统的设备型号、安装点位、额定运行参数，每半年同步更新一次，适配片区消防资源普查、规划编制等中长期工作；运维层数据为动态实时数据，包含设备运行状态、故障告警信息、巡检维保台账、构件老化数据，依托物联网终端实时同步上传，专供应急救援、隐患排查等高频动态场景使用。同时采用三角面片简化算法，对上传模型进行轻量化压缩，剔除细小倒角、装饰

构件等无关元素，在保留消防核心构件参数的前提下，降低模型内存占用，提升 CIM 平台加载速率。

（三）一体化数字底座架构与权限管控机制

依托多尺度接入标准与轻量化上传技术，搭建四层一体化城乡消防数字底座，自下而上分别为地理基底层、设施数据层、模型融合层、功能应用层，同时配套跨部门权限管控体系，实现数据统一管理、分级共享、高效应用。地理基底层依托 CIM-GIS 底层数据，收录城市地形地貌、行政边界、路网水系等基础地理信息；设施数据层整合市政消防设施、城乡片区风险数据；模型融合层叠加全域单体建筑轻量化 BIM 消防模型，实现微观与宏观数据双向联动；功能应用层面向政府部门、运维企业、救援机构开放规划研判、隐患排查、应急调度、资产统计等核心功能。

在权限管控方面，针对住建部门、消防救援大队、市政运维单位、社区管理部门差异化分配权限。消防救援部门拥有全域数据浏览、应急调度、模型调取的最高权限；住建部门侧重调取老旧建筑、新建项目消防数据，用于城市更新规划编制；市政运维单位仅可编辑管辖范围内市政供水、救援站点数据；社区管理人员仅可查看辖区内建筑消防基础数据，无数据编辑权限。多层级架构搭配分级权限机制，既保障数字底座数据互通，又规避涉密数据泄露风险，筑牢城乡一体化消防治理的数据根基。

三、基于 CIM 大数据的片区消防承载力研判与规划指导

消防承载力是衡量城市片区、乡村区域消防安全上限的核心指标，指代特定区域内消防供水设施、救援站点、疏散通道、建筑防火体系能够承载的最大火灾风险与应急处置能力。依托 CIM 平台汇聚的海量多源消防大数据，从资源承载力、救援承载力、风险抵御承载力三个维度建立量化评价模型，精准识别区域消防配套短板，以此靶向指导城市更新改造、乡村基础设施建设过程中的消防专项规划工作，优化城乡消防资源空间布局，实现风险与资源动态平衡。

（一）消防承载力多维度量化评价模型构建

结合城乡消防安全运行逻辑，选取多维度评价指标，采用层次分析法确定指标权重，构建适配不同片区类型的消防承载力量化评价模型。评价体系整体分为目标层、准则层、指标层三级结构，目标层为片区综合消防承载力；准则层包含

消防资源承载力、应急救援承载力、建筑风险抵御承载力三大模块；指标层下设二十余项细分量化指标，全方位覆盖软硬件消防配套资源。

消防资源承载力主要评价区域硬性消防设施配置水平，涵盖市政消火栓覆盖率、管网平均供水压力、消防蓄水池有效容积、救援站点密度、应急物资储备总量等正向指标，指标数值越高，区域基础消防保障能力越强；应急救援承载力聚焦通行与调度能力，包含消防车平均出警时长、主次干道通行通畅率、应急疏散通道完整度、密闭构筑物排烟能力；建筑风险抵御承载力以建筑集群属性为主，囊括区域建筑平均耐火等级、老旧危房占比、防火分区合规率、人员聚居密度、可燃物荷载均值。平台根据指标权重加权计算，将片区承载力划分为优秀、良好、合格、薄弱四个等级，直观判定区域消防综合水平。

（二）城市更新视角下片区消防短板靶向改造

针对城市更新项目中的老旧街区、老旧小区、工业园区等承载力薄弱片区，依托 CIM 评价模型输出的短板清单，制定差异化、靶向化的消防更新改造方案，替代传统一刀切的改造模式，提升城市更新资金利用效率。对于供水承载力薄弱区域，优先增补市政消火栓、翻新锈蚀老化供水管网、增设应急消防蓄水池，补齐供水设施短板；对于救援通行薄弱的老旧街巷，拓宽狭窄消防通道、清理违章搭建障碍物、规划环形救援车道，打通消防救援“最后一公里”；对于建筑风险过高的老旧小区，统一更换老旧电气线路、增设防火分隔构件、升级楼道应急疏散设施，降低连片火灾发生概率。

与此同时，CIM 平台可对更新改造方案进行仿真预演，模拟改造前后片区火灾蔓延范围、救援时长、人员疏散效率的变化，预判改造方案实施效果，迭代优化改造计划。同时将所有更新改造项目录入数字底座，实时更新设施参数与承载力评分，形成“风险研判—短板识别—方案改造—效果复盘”的闭环更新模式，助力城市更新工作高质量落地。

（三）乡村建设背景下消防配套资源优化布局

相较于城市建成区，乡村区域消防资源分散、建设资金有限、基础设施薄弱，无法照搬城区高密度、高标准的消防配套模式。依托 CIM 平台全域乡村地理与消防数据，结合乡村人口分布、产业布局、地形特征，推行低成本、适配性强、集约化的消防配套规划方案。在人口聚居密集的行政村，布设微型消防站点、简易室外消火栓，依托村内池塘、河道打造天然消防取水点；在分散式散户聚居区域，

推广便携式灭火设备，完善村级应急联防机制；在农产品加工厂房、仓储基地等高危产业区域，按照高标准增设排烟、报警、灭火设施，单独划定专属防火分区。

除此之外，平台结合乡村灾害发生规律，统筹规划消防应急通道，结合乡村现有村道、机耕道进行硬化升级，避免重复建设浪费资金；同步优化微型消防站选址，以最短通行距离覆盖全域村落，兼顾经济性与安全性。该规划模式能够适配乡村建设的发展现状，破解乡村消防配套规划盲目化、同质化难题，逐步缩小城乡消防安全差距，推动城乡消防公共服务均等化发展。

通过分类归集市政供水、救援站点、老旧街区及乡村片区多类型消防基础设施数据，并依托表格量化对比不同区域消防风险与配套差异，可实现 CIM 平台全域消防数据的标准化、精细化管控；通过制定统一的数据接入标准，完成 BIM 模型轻量化分层上传，搭建多尺度城乡一体化消防数字底座，彻底打通微观建筑与宏观城市的数据壁垒；基于承载力量化评价模型，精准识别城乡片区消防短板，分别适配城市更新与乡村建设场景制定针对性规划改造策略，优化消防资源空间布局。该套技术体系完善了 CIM 平台消防数据的应用逻辑，拓宽了数字化技术在城乡公共安全领域的应用边界，为智慧城市全域消防治理提供科学、可落地的技术支撑。

第四节 消防 BIM 数据驱动的土木工程运维决策

建筑全生命周期服役周期普遍可达 50 年及以上，在长期服役过程中，受材料老化、环境侵蚀、荷载往复作用、日常运维损耗等多重因素影响，建筑防火结构构件、消防机电设备会出现不可逆的性能衰减，极易滋生隐性消防安全隐患。以 BIM 全生命周期消防数据为核心驱动源，整合历史火灾模拟数据、构件耐火性能参数、设备运维台账数据，精准预判建筑消防性能衰减规律，定位高危风险构件，制定分批次分级改造计划，并量化改造工程量与工程造价，构建数据驱动型科学化运维决策体系，全面提升土木工程消防运维决策的专业性与精准度。

一、基于 BIM 数据库的建筑消防性能衰减预判体系

消防性能衰减预判是前置化解建筑消防安全隐患、实现主动式运维管理的核心前提，其本质是依托海量历史数据与实时运行数据，结合材料老化规律、火灾

损伤机理，推演建筑被动防火体系与主动消防系统的长期性能变化趋势。依托完善的 BIM 消防数据库，整合历史火灾仿真模拟成果、构件耐火试验数据、长期环境监测数据、设备老化台账，搭建多维度性能衰减预判模型，区分结构构件与机电设备的差异化衰减特征，实现消防性能衰减趋势可视化、风险等级量化、失效时间可预判。

（一）BIM 消防数据库多源数据整合归集

性能衰减预判工作的精度直接取决于 BIM 数据库的数据完备度与数据质量，为此需全方位归集四大类核心数据源，形成复合型预判数据库。第一类为历史火灾模拟数据，包含建筑全域不同起火点位、不同火灾荷载、不同升温曲线下的仿真成果，涵盖构件温度应力变化、烟气蔓延路径、耐火极限损耗、结构强度折减等仿真参数，用于研判明火灼烧对防火构件的永久性损伤；第二类为构件耐火基础数据，收录不同材质混凝土、防火涂料、耐火板材、防火门窗的耐高温参数、老化衰减系数、疲劳损伤阈值、服役年限基准值；第三类为外部环境监测数据，包含建筑内部温湿度、酸碱腐蚀气体浓度、雨雪渗透范围、温差交变频次，分析自然环境对消防设施的慢性侵蚀作用；第四类为全生命周期运维台账数据，涵盖历年巡检记录、故障维修明细、零部件更换数据、构件加固改造历史资料，复盘过往运维作业对消防性能的正向增益与负面损耗。

在数据整合层面，依托第八章第一节数字化消防资产库的存储架构，统一各类数据存储格式，将仿真数据、试验数据、环境数据、运维台账数据统一绑定至对应 BIM 构件属性面板，实现一键调取、联动分析。同时对原始数据进行预处理，剔除异常干扰数据、补齐缺失字段、完成数据脱敏处理，按照构件类型、设备品类、服役时长进行分类归档，为衰减模型运算提供高质量的数据支撑，从源头保障预判结果的准确性。

（二）被动防火结构构件衰减规律研判

被动防火结构构件的性能衰减具备长期性、缓慢性、不可逆性的基本特征，主要受混凝土碳化、防火涂料老化、钢筋锈蚀、环境介质腐蚀、过往火灾余热损伤五大因素影响，其衰减过程无法通过人工巡检直观判定，需要依托数据模型进行精细化推演。结合 BIM 数据库内长期监测数据，拟合构件耐火极限随服役年限变化的衰减函数，精准量化不同服役阶段构件的性能损耗程度。对于钢筋混凝土防火构件，模型重点测算混凝土碳化深度、防火保护层脱落面积、内部钢筋锈

蚀率三大指标，研判其耐火极限衰减趋势；对于钢结构防火包覆构件，聚焦防火涂料粉化、开裂、脱落等病害，结合环境温湿度交变数据，测算涂料有效防护年限；对于防火隔墙、防火封堵、耐火门窗等附属分隔构件，分析密封胶老化、填充材料受潮、五金配件锈蚀带来的密闭性能损耗。同时调取历史火灾模拟数据，针对曾经历火情灼烧的构件，单独核算高温造成的永久性强度折减值，叠加自然老化损耗，精准判定构件剩余耐火年限，划分正常服役、预警管控、强制改造三个性能等级。

（三）主动消防机电设备失效趋势预判

相较于静态结构构件，主动消防机电设备的性能衰减速度更快、失效诱因更为复杂，衰减规律受设备出厂质量、运行频次、维保力度、环境湿度、零部件老化多重因素共同影响。依托 BIM 内置的设备全生命周期运维数据，结合设备厂家提供的老化基准曲线，搭建动态衰减预判模型，分别研判灭火系统、通风排烟系统、智能探测系统三大类设备的失效趋势。灭火类设备以管网锈蚀、喷头老化、灭火剂失效为主要衰减诱因，模型依据管网试压历史数据、喷头服役时长、灭火剂灌装日期，预判管网泄漏风险与药剂失效时间；防排烟动力设备以电机轴承磨损、叶片锈蚀、线路老化为核心失效点，结合设备启停频次、运行振动数据、维保润滑记录，预测电机故障概率与设备报废周期；智能探测类设备主要受灵敏度衰减、内置电池老化、信号模块损耗影响，通过汇总历史校准数据、电池充放电记录、信号延迟参数，设定灵敏度预警阈值，提前提示运维人员完成设备校准与电池更换。该预判模式能够实现设备故障由事后抢修向事前预警转型升级，大幅降低机电设备隐性失效带来的消防安全隐患。

二、基于风险评级的高危消防构件定位与分级改造规划

在完成建筑消防性能衰减预判的基础上，以构件剩余耐火性能、失效风险等级、影响覆盖范围为核心评价指标，建立高危消防构件风险评级体系，依托 BIM 模型可视化高亮所有高风险构件与设备。结合项目运维预算、施工难度、风险紧急程度，将改造项目划分为应急改造、中期优化、远期升级三个层级，制定分批次、分区域、分优先级的消防改造与加固运维计划，解决传统运维改造盲目无序、资金浪费、高风险隐患处置滞后等行业痛点。

（一）多维指标融合的构件风险评级体系

为科学划分构件风险等级，规避单一评价指标带来的研判偏差，构建多维度融合风险评级体系，评价指标包含剩余耐火极限衰减率、构件服役超期程度、故障发生概率、失效影响范围、改造施工难度五项核心内容。通过层次分析法赋予各项指标对应权重，加权计算风险综合评分，将所有消防构件、机电设备划分为极高风险、高风险、中风险、低风险四个等级，评分越高代表构件消防安全隐患越大，改造优先级越高。极高风险构件指代剩余耐火性能低于规范阈值 50%、设备超期服役、故障概率超过 60% 的核心承重防火构件与核心消防设备，该类构件一旦失效，会直接导致分区防火体系崩溃，引发重大火灾安全事故；高风险构件为耐火性能衰减 30%—50%、局部存在老化病害、存在间歇性故障的附属防火构件与次要机电设备；中风险构件整体性能满足规范底线，但存在局部老化隐患，无需紧急改造，可纳入常态化维保清单；低风险构件性能完好、衰减速率缓慢，仅需维持常规巡检即可。评级完成后，在 BIM 模型内采用红、橙、黄、绿四种颜色分层高亮展示，直观呈现全域高危构件分布区域。

（二）高危风险构件精准定位与隐患溯源

依托 BIM 三维可视化空间定位技术，结合风险评级结果，实现高危消防构件一键定位、隐患精准溯源。管理人员可通过风险等级、构件类型、所属防火分区多维度筛选所有高危构件，模型自动跳转至对应空间位置并高亮预警，同时弹窗展示构件综合风险评分、性能衰减明细、主要隐患诱因、规范合规偏差值、改造建议方案。相较于传统人工隐患排查模式，该定位方式能够快速锁定隐蔽工程内部老化构件、不易巡检的高空设备，解决隐性隐患排查难度大、耗时长的难题。同时依托 BIM 数据库完成隐患溯源分析，针对评级异常的高危构件，回溯其全生命周期数据，区分隐患产生的核心诱因：因自然老化、环境侵蚀产生的隐患，纳入常态化改造清单；因过往火灾高温损伤造成的性能衰减，优先进行加固补强；因前期施工质量缺陷、设计参数不合理引发的固有隐患，结合建筑整体防火体系，重新优化改造方案，从根源上消除安全隐患。精准定位与溯源分析能够有效减少无效改造作业，提升运维改造工作的针对性与科学性。

（三）分批次分级消防加固改造运维计划编制

结合高危构件风险等级、施工约束条件、项目运维年度预算，编制长中短期相结合的分级改造运维计划，平衡消防安全保障需求与项目经济效益，杜绝盲目

全域翻新造成的资金浪费。应急改造计划针对极高风险构件，要求 1-3 个月内完成专项加固、设备更换作业，优先调拨专项资金，简化审批流程，限时消除重大安全隐患，筑牢消防安全底线；中期优化计划面向全域高风险构件，以季度、半年度为周期，结合建筑业态空置窗口期，分批开展防火涂料重涂、封堵构件更换、老旧管线翻新、老化设备更替等改造作业；远期升级计划覆盖中风险构件与整体防火体系，纳入建筑 3—5 年中长期运维规划，同步配套年度专项改造预算，逐步完成老旧防火结构整体加固、消防系统智能化升级，全面提升建筑消防综合抵御能力。

此外，改造计划同步录入 BIM 运维台账，明确每项改造作业的责任部门、完成时限、施工工艺标准、验收规范，改造完成后实时更新构件风险等级与耐火参数，形成风险评级—构件定位—分级改造—性能复核的闭环运维管理模式，实现建筑消防运维工作规范化、有序化、层级化发展。

三、运维改造工程量造价量化与数字化决策支撑

消防升级改造工程的工程量统计、造价预算是运维决策的重要组成部分，也是审批改造方案、分配专项资金、控制改造成本的核心依据。依托 BIM 模型参数化、算量化的核心优势，自动统计加固改造、设备更换、系统升级的全部工程量，结合内置工程造价数据库，一键测算分项造价与总投资成本，输出标准化工程量清单与造价分析报表，为建设单位、运维部门、审批部门提供全方位数字化决策依据，实现消防改造工程成本可控、进度可控、质量可控。

（一）BIM 模型驱动消防改造工程量自动化精准统计

在传统的消防设施改造工程中，工程量统计工作高度依赖造价专业人员通过人工方式仔细测算设计图纸，并结合现场实地丈量进行反复核算。这种作业模式不仅耗时漫长，而且极易引入人为误差，导致漏算、错算等问题频繁发生，常常引发项目预算超支、工程量核算结果出现显著偏差等严重后果。如今，基于已完成改造规划设计的 BIM（建筑信息模型）模型，依托专门二次开发的智能算量插件，并绑定国家统一的工程量计算规则，可以实现对各类消防改造项目明细工程量的全自动统计，全面覆盖结构加固、构件翻新、设备更换、管线敷设四大核心改造类别。具体而言，在结构加固类别中，系统能够自动统计出防火混凝土的浇筑体积、防火涂料的喷涂面积、加固所用钢筋的吨位以及耐火板材的铺设面积；在构件翻

新类别中,可精准核算防火隔墙的拆除面积、老旧门窗的拆除数量、密封胶的更换长度以及防火封堵部位的翻新体量;在设备更换类别中,自动汇总如喷淋喷头、消防水泵、排烟风机、火灾探测报警器等各类设备的更换数量及其对应型号规格;在管线敷设类别中,则详细统计消防管网的拆除长度、新增管线的敷设长度以及阀门配件等的更换数量。所有统计生成的工程量数据均与 BIM 模型中的构件对象一一关联绑定,用户可随时点击模型中的任意构件,核验并查看其详细的测算明细,从而实现了工程量测算全过程的可追溯性,确保数据精准无误。与完全依赖人工测算的传统模式相比,此种自动化统计方法能使工作效率提升 70% 以上,同时将误差严格控制在 2% 以内。

(二) 基于自动化数据的精细化分项工程造价测算与全成本拆解

在完成自动化工程量统计的基础上,系统内部嵌入了与项目所在地相匹配的工程造价数据库。该数据库全面涵盖了建材市场单价、设备采购价格、人工施工单价、机械租赁费用、规费及税金等动态成本数据,并可根据市场价格的波动进行周期性更新,从而保障了造价测算工作的时效性与结果准确性。系统通过关联已生成的工程量清单,自动完成各分部分项工程的造价测算,输出包括材料费、人工费、机械使用费、项目管理费、企业合理利润以及应缴税金在内的六大成本明细。同时,系统还能按照改造项目的实施层级,进一步拆解出应急改造、中期优化以及远期升级三类不同阶段项目的独立造价,极大地方便了项目管理人员分阶段规划与拨付专项资金。

针对消防专项改造工程的特殊性,系统还单独增设了备品备件采购成本、老旧构件拆除及建筑垃圾清运成本、施工期间临时安全防护成本、消防系统联动调试成本等四大专项费用科目,有效补全了传统造价测算中容易遗漏的项目,使整个造价核算体系更为完善。此外,系统支持多改造方案的造价比对功能,能够针对同一高危构件提供多种可行的加固改造方案,并自动测算各方案对应的工程量与总造价,综合权衡改造成本、所需施工周期以及防火性能提升效果等多重因素,从而辅助项目管理人员择优选择性价比最高的改造方案,实现项目资金配置结构的优化。

(三) 面向多元场景的数字化决策报表自动生成与全维度管理决策支撑

为了适应管理层项目审批、工程招投标、专项资金申报等多元化决策场景的需求,BIM 管理平台能够自动生成全套标准化的数字化决策报表。这套报表体系

涵盖性能衰减分析报告、高危构件风险预警清单、分级分阶段改造计划表、详细工程量清单、分项造价预算表以及多方案技术经济比选分析报告等六大核心模块。所有报表格式均严格契合国内土木工程领域消防改造项目的审批规范要求，可直接用于组织内部审批流程或向上级主管部门进行专项资金申报。

从决策支持的应用层面深入分析，该数字化体系能够为不同层级的管理人员提供强有力的决策支撑：基层运维人员可以依托系统提供的性能衰减预判数据与高危构件详细清单，制定出更为精细化的现场施工与改造方案；中层管理人员则可以利用系统生成的分级改造计划与详细的造价拆解数据，有效地统筹年度运维预算、合理分配施工资源；高层决策人员能够借助系统输出的综合分析报表，从战略高度研判建筑整体的消防改造方向，并审批中长期改造规划。与此同时，所有在决策过程中产生和使用的数据都将永久归档至 BIM 消防资产信息库中，形成完整的项目决策台账，实现了对改造项目从规划、设计、施工到运维的全生命周期溯源管理。这彻底改变了以往主要依赖个人经验进行主观决策的传统老旧模式，有力推动了土木工程消防运维决策向数据化、科学化、精细化的方向全面转型升级。

通过整合多源 BIM 消防数据搭建性能衰减预判模型，能够精准推演被动防火构件与主动消防设备的长期老化失效规律，实现隐患前置预警；依托多维风险评级体系完成高危构件分级定位，结合风险紧急程度编制分批次、多层次的消防加固改造计划，有效解决运维改造无序化的行业痛点；利用 BIM 自动化算量与造价测算功能，精准统计改造工程量、拆解分项成本并输出标准化决策报表，全方位支撑消防升级工程的方案审批、资金调配与施工管理。该数据驱动型运维决策模式，打通消防性能预判、风险排查、改造规划、造价管控全链条，丰富了 BIM 数据资产在运维决策层面的延伸价值，为现代高层建筑及大型公共建筑消防运维管理提供全新的数字化决策范式。

第九章 转型阻力、实施路径与组织变革—— 建筑学组织视角

第一节 建筑设计单位应用 BIM 进行消防设计的现实障碍

在建筑业数字化纵深转型的行业背景下，以 BIM 为核心载体的数字化正向消防设计，逐步取代传统二维图纸消防报审模式，成为大型公共建筑、超高层建筑、城市综合体项目消防专项设计的主流发展方向。立足于建筑学组织视角，结合行业技术标准、设计单位内部组织架构、市场化运行逻辑，深度剖析 BIM 消防设计落地的多维阻碍，可为后续组织变革、路径优化提供底层依据，加速数字化消防设计模式规模化普及。

一、行业技术层面 BIM 消防设计配套制约因素

技术体系不完善是制约 BIM 消防设计大规模落地的底层核心原因，完整的数字化设计工作离不开标准化行业规范、互通兼容的软件生态、成熟的专项仿真工具以及适配本土工程的参数数据库。现阶段我国 BIM 消防设计仍处于碎片化发展阶段，国家与行业专项规范存在条文空白、各类设计仿真软件数据壁垒突出、本土化消防参数库缺失，整套技术体系尚未完全成型，不仅增加设计单位 BIM 正向消防设计的试错成本，也大幅降低数字化设计成果的报审通过率，从技术层面限制行业整体转型节奏。

（一）BIM 消防专项设计规范体系存在结构性空白

建筑消防设计具备极强的合规性属性，所有设计动作、构件参数、分区布局均需要严格参照国家现行防火设计规范完成，规范体系是保障 BIM 消防设计合法化、标准化的制度基础。当前国内二维消防设计已经形成覆盖建筑、机电、给排水、防排烟全专业的成熟规范体系，条文细则、报审标准、验收指标清晰明确，能够直接指导设计师完成全流程设计工作。反观 BIM 数字化消防设计领域，相关规范建设进度严重滞后于技术迭代速度，现存规范大多仅针对通用 BIM 建模、

模型交付、数据存储做出基础性规定，尚未针对消防专项设计制定层级化、精细化的执行标准，无法适配正向设计的作业需求。

从规范空白维度进行拆解，首先为建模标准空白，现行规范未明确防火构件、消防机电设备的建模精细度层级、属性录入字段、命名统一规则，不同设计人员、不同设计分院输出的消防 BIM 模型格式混乱、参数字段不一，无统一的行业执行基准，导致模型无法跨团队、跨项目复用；其次为性能化设计条文缺失，我国现行《建筑设计防火规范》以指令性条文为主，明确规定构件耐火极限、疏散距离、防火分区面积等硬性指标，但并未配套适配 BIM 火灾仿真、疏散模拟的性能化评判标准，无法界定仿真结果的合规阈值，使得性能化消防设计成果难以通过住建部门与消防救援机构的专项审查；最后为交付验收规范不完善，现阶段暂无统一的 BIM 消防模型报审交付标准，各地主管部门审查口径存在明显地域差异，部分地区仅认可二维图纸报审，不接收三维模型成果，设计单位投入成本完成 BIM 消防设计后仍需二次绘制二维图纸，造成资源冗余浪费，极大打击企业转型积极性。

除此之外，规范更新滞后性问题进一步放大技术落地难度。随着新型建筑业态不断涌现，复合型商业综合体、地下立体空间、高层康养建筑等特殊建筑的消防设计逻辑愈发复杂，传统指令性规范难以全覆盖特殊工况，亟需依托 BIM 性能化设计完成差异化风控设计。但相关专项补充规范更新周期漫长，无法适配新型建筑业态的设计需求，使得 BIM 消防设计的技术优势无法转化为合规优势，陷入“技术可行、规范受限”的发展僵局。

（二）多品类设计仿真软件生态兼容性壁垒

完整的 BIM 消防正向设计流程，需要统筹三维建模、水力计算、火灾动态仿真、疏散模拟、防排烟验算五类软件协同作业，多软件数据互通是保障设计效率、保障参数一致性的必要前提。现阶段国内 BIM 消防设计软件市场呈现碎片化格局，国外通用 BIM 建模软件、国产专项消防仿真软件、机电水力计算软件分属不同研发厂商，各软件底层数据架构、编码规则、模型存储格式相互独立，尚未形成一体化协同生态，跨软件数据传输过程中普遍存在模型破损、参数丢失、数据偏移、精度衰减等问题，形成难以破除的软件数据孤岛。

在实际工程设计场景中，设计人员通常依托 Revit 完成建筑消防主体建模，再将模型导入 PyroSim、Fluent 等仿真软件开展火灾烟气蔓延模拟与温度场分析，

同时搭配专业防排烟计算软件完成风压与风量验算。由于软件之间未搭建专属数据交互接口,直接格式转换会导致防火分区边界失效、消防管网拓扑结构错乱、构件耐火参数清零等问题;为规避数据偏差,设计人员只能采取手动二次建模的作业模式,在不同软件内重复搭建同款消防模型,不仅额外增加 30% 以上的设计工时,还极易因人工录入误差引发参数不匹配问题,违背 BIM 参数化协同设计的核心初衷。相关实测数据表明,未经接口优化的跨软件模型转换,整体数据误差最高可达 18%,已经超出消防设计允许的误差阈值,直接影响仿真验算结果的有效性。

同时,国外主流 BIM 建模软件本土化适配程度不足也是突出短板。欧美国家消防设计规范、防火分区划分逻辑、设备布设标准与我国存在显著差异,原版软件内置的消防构件族库、参数校验规则无法直接适配国内项目,设计单位需要投入高额成本开展二次开发与族库定制;而国内自研 BIM 软件起步较晚,消防专项设计功能不完善,对于复杂超高层、异形建筑的曲面防火构件建模支持能力较弱,暂无法完全替代国外商用软件,兼容性矛盾成为长期制约 BIM 消防一体化设计普及的关键技术痛点。

（三）本土化消防构件数据库与校验工具缺失

参数化数据库是 BIM 消防设计运行的底层内核,构件材质参数、设备性能阈值、规范校验红线、材料耐火属性等基础数据,直接决定消防模型的完整性与合规性。当前行业内尚未建成统一且公开的本土化 BIM 消防专用数据库,绝大多数设计单位仅能依托通用构件库开展基础建模工作,通用数据库内部参数多参照欧美防火规范设定,与我国本土防火材料性能、设备额定参数、规范约束指标存在偏差,无法直接用于高精度消防专项设计。

从数据库应用层面分析,一方面,防火结构构件数据库内容覆盖面狭窄,缺少适配国内建材市场的防火混凝土、阻燃保温材料、防火涂料、耐火封堵板材的精细化参数,设计师仅能手动查阅材料检测报告逐一录入参数,作业效率低下且易出现人为录入错误;另一方面,消防机电设备数据库更新滞后,市面上新型智能消防报警设备、变频排烟风机、智能喷淋系统无法在通用族库中匹配对应参数,老旧失效参数未及时清理,极易造成设计选型与市场实物脱节,出现图纸可设计、现场无法采购施工的矛盾。除此之外,合规性自动校验工具的缺失进一步加剧设计负担,现阶段 BIM 平台无法内置国内防火规范校验逻辑,无法自动筛查防火

分区超标、疏散距离超限、设备布设违规等常见问题，设计师仍需人工逐条校核模型参数，数字化降本增效的价值无法落地。

二、设计单位内部消防 BIM 应用组织管理短板

建筑学视角下的数字化转型，本质不只是工具层面的软件迭代，更是企业内部组织架构、岗位职责划分、协同设计流程、人才培养体系的全方位变革。现阶段多数建筑设计单位仍沿用适配二维图纸时代的传统组织管理模式，专业部门条块分割、建筑师与消防工程师岗位权责割裂、数字化绩效考核机制缺失、管理层转型认知不足，老旧组织架构与 BIM 一体化协同设计模式相互冲突，内部组织阻力成为阻碍 BIM 消防设计落地的核心内部因素。

（一）传统专业条块分割与协同架构僵化

国内大中型建筑设计单位普遍采用专业化事业部制组织架构，按照建筑、结构、给排水、暖通、电气五大专业划分独立设计部门，消防设计工作被拆解至多个专业内部，由给排水部门负责喷淋与消火栓系统设计、暖通部门负责防排烟系统设计、建筑部门负责防火分区与疏散体系设计，各专业部门独立作业、各司其职，形成条块分割的垂直化管理模式。该架构适配传统二维串行设计模式，但与 BIM 消防一体化并行协同设计的作业逻辑完全相悖，严重制约数字化设计模式落地。在 BIM 正向消防设计模式中，防火分区布局、疏散通道规划、喷淋管网布设、排烟风机点位具备极强的关联性，单一参数调整会同步影响多个专业的设计成果，需要多专业设计师实时协同、同步迭代。但在传统组织架构下，各专业部门存在明确的权责边界与作业壁垒，部门之间缺乏常态化协同沟通渠道，设计变更仍沿用二维时代的单向流转模式，建筑专业完成方案设计后向下游专业交付模型，下游专业被动适配，无法实现双向联动优化。例如建筑专业调整防火分区边界后，无法实时同步提醒机电专业优化消防管网布局，极易出现管线与防火隔墙碰撞、设备跨分区布设等合规性问题，大幅增加后期模型整改工作量。与此同时，僵化的组织架构导致责任划分模糊。BIM 消防一体化设计打破传统专业边界，一旦出现设计违规、报审驳回等问题，各专业部门易出现责任推诿现象，无法精准定位责任主体。出于风险规避心理，多数部门管理层抵触组织架构调整，固守原有串行设计模式，进一步固化组织层面的转型阻力，阻碍数字化协同模式推广应用。

（二）建筑师与消防工程师岗位职能割裂失衡

在完整的建筑消防设计体系中，建筑师作为方案设计的第一责任人，负责统筹建筑整体布局、防火分区划分、人员疏散路径规划等宏观防火设计内容；消防专项工程师负责细化机电消防系统、验算耐火参数、匹配合规设备，二者相辅相成、协同配合，共同完成一体化消防设计。但现阶段国内设计单位普遍存在岗位职能两极分化的问题，要么建筑师过度主导消防设计、弱化消防工程师专项作用，要么消防工程师独立完成后期专项深化，建筑师全程缺位，岗位割裂问题直接导致 BIM 消防设计质量参差不齐。

从岗位分工现状来看，中小型设计单位普遍存在“重方案、轻消防”的管理思维，仅配备少量消防专项工程师，且工程师不参与前期方案设计阶段，仅在建筑方案定稿后，被动根据既定平面布局完成消防机电系统深化设计。此种分工模式下，前期建筑方案极易出现疏散距离超限、防火分区面积超标、消防通道缺失等先天性设计缺陷，而后期消防工程师无法反向调整建筑方案，仅能通过微调设备点位弥补隐患，无法从根源优化消防设计，BIM 性能化前置风控的核心价值彻底失效。反观部分大型设计院，存在消防工程师权限过度扩张的问题，方案阶段过度干预建筑业态布局，导致建筑空间美学、使用功能与消防规范相互冲突，降低建筑设计综合品质。

此外，两类岗位人员的知识结构存在天然断层。多数建筑学出身的设计师仅掌握基础防火规范条文，不熟悉消防机电系统运行原理、火灾仿真底层逻辑；专职消防工程师深耕机电消防设计，但缺乏建筑空间布局思维，无法统筹平衡消防合规性与建筑使用体验。在 BIM 一体化设计作业中，知识壁垒进一步放大岗位割裂矛盾，难以形成高效协同的设计团队。

（三）数字化绩效考核与激励机制缺失

绩效考核与激励机制是引导内部员工主动转型、适配数字化设计模式的重要指挥棒。当前绝大多数建筑设计单位的薪酬核算、绩效考评体系，依旧沿用二维图纸设计时代的考核标准，以图纸出图数量、项目完成工期、施工图绘制面积作为核心考核指标，未增设 BIM 消防正向设计对应的专项考核维度，既无对应的正向激励政策，也无配套的转型容错机制，设计师转型动力严重不足。

从基层设计师视角分析，BIM 消防正向设计的学习成本、工时成本远高于传统二维设计。设计师不仅需要熟练掌握 BIM 建模软件、火灾仿真工具，还需

要统筹多专业协同作业，单项目设计周期相较于二维模式延长 15%—25%，在绩效薪酬与出图量直接挂钩的考核机制下，转型数字化设计会直接降低个人短期收益。与此同时，企业管理层未配套专项培训补贴、数字化岗位津贴、项目超额奖励，员工投入大量时间学习新技术、优化 BIM 消防模型后，无法获得对等的经济回报，主观转型意愿持续走低。从管理层视角分析，部分设计单位过度追求短期经济效益，将数字化转型视为成本负担而非长期战略投资，未设立 BIM 消防转型专项预算，既无法引进高端仿真软件、升级硬件设备，也无法常态化开展全员技能培训；同时缺乏容错机制，对于试点项目中出现的设计失误、工期延误采取零容忍态度，导致项目负责人惧怕转型风险，优先选择成熟稳定的二维设计模式，组织内部自上而下形成抵触数字化转型的负面氛围。

三、市场化维度 BIM 消防设计落地约束条件

建筑设计行业属于市场化竞争型服务业，项目成本投入、交付周期要求、业主方决策需求、行业定价模式直接决定设计单位的作业模式选择。从市场化运行层面分析，现阶段 BIM 消防设计尚未形成成熟的商业化盈利模式，数字化设计投入成本偏高、项目交付周期无法适配市场节奏、业主方数字化认知参差不齐、行业收费标准缺失，多重市场化约束条件叠加，大幅压缩 BIM 消防设计的落地空间，成为制约技术规模化普及的外部关键阻力。

（一）数字化转型综合投入成本居高不下

设计单位推行 BIM 消防一体化设计，需要一次性投入持续性综合成本，涵盖软硬件采购成本、人员培训成本、试错沉没成本、二次开发成本四大板块，高额的综合投入对于中小微型设计单位而言难以承受，即便是大型头部设计院，也面临投入与收益失衡的产业化难题。结合行业调研数据显示，同等规模项目采用 BIM 消防正向设计的综合成本，相较于传统二维设计高出 12%—20%，成本劣势成为阻碍产业化推广的首要短板。软硬件采购成本为固定硬性投入，设计单位需采购高阶 BIM 建模软件、专业火灾仿真软件、防排烟验算工具，并配套升级高性能图形工作站、云端协同服务器，单套完整数字化设备与软件授权年费成本可达数十万元；人员培训成本属于持续性可变成本，为保障全员适配一体化设计模式，企业需要定期组织 BIM 建模、消防仿真、多专业协同相关培训，同时员工脱产学习、技能实操会占用正常工作工时，间接增加企业人力成本；试错沉没成

本主要集中在转型初期,设计师熟练度不足、协同流程不完善,会导致项目返工率上升、交付周期延长,额外产生工期成本与整改成本;二次开发成本主要用于本土化族库定制、规范校验插件研发,国外原版软件无法适配国内消防设计需求,定制化开发需要依托第三方技术服务商,进一步增加企业资金投入。

从成本回收层面来看,目前行业内无专项 BIM 设计溢价收费标准,设计单位自主承担全部转型成本,但无法向业主方收取数字化设计附加费用,成本无法向下游转嫁,长期高投入、低回报的市场化现状,导致多数中小设计单位直接放弃数字化转型,仅头部企业出于品牌战略需求开展小范围试点应用。

(二) 项目交付周期与市场节奏相互冲突

当前国内建筑设计行业整体呈现短周期、快周转的市场化发展特征,地产类商业项目、政府类基建项目普遍压缩设计周期,倒逼设计单位高速出图、快速报审,以此缩短项目整体建设周期、降低资金占用成本。BIM 消防正向设计受建模工时、协同磨合、仿真验算、模型迭代等多重因素影响,整体作业周期长于传统二维设计模式,与行业快周转的市场节奏形成天然冲突,难以适配绝大多数市场化项目的交付要求。在项目前期方案阶段,BIM 消防一体化设计需要完成精细化三维建模、防火分区仿真优化、多方案疏散模拟比选,相较于直接绘制二维平面图纸,前期作业工时增加 20% 以上;在施工图深化阶段,多专业协同迭代、模型合规性校验、跨软件仿真验算,会进一步拉长交付周期。对于周期敏感型商业地产项目,业主方优先追求交付速度而非数字化设计成果,多数业主会明确要求设计单位采用传统二维模式出图,规避数字化设计带来的工期延误风险。即便部分业主允许采用 BIM 模式设计,也会设置严苛的工期违约处罚条款,将转型风险全部转移至设计单位,进一步打击企业应用 BIM 消防设计的积极性。

除此之外,消防报审流程的滞后性进一步放大周期矛盾。现阶段全国大部分地区消防报审仍以二维图纸为核心审查载体,BIM 三维模型仅作为辅助参考资料,设计单位完成 BIM 消防模型设计后,仍需额外耗费工时反向导出、绘制二维施工图,形成“BIM 建模+二维出图”的双重作业模式,不仅无法缩短交付周期,反而额外增加设计负担,违背数字化转型降本增效的初衷。

(三) 业主方认知偏差与差异化需求约束

业主方作为项目投资主体与需求制定主体,其数字化认知水平、项目功能需求、成本管控诉求,直接决定项目设计模式的选择。现阶段国内业主方群体结

构分化明显，国有城投平台、大型央企业主数字化接受度较高，愿意投入资金推广 BIM 消防设计；而民营地产企业、小型私人业主普遍存在认知偏差，对 BIM 消防设计的价值认知不足，且拒绝承担额外数字化投入成本，从需求端制约技术落地。

从需求端痛点进行拆解，第一，多数中小型业主存在价值认知误区，片面认为 BIM 消防设计仅为三维可视化展示工具，无法直观提升建筑商业价值，相较于可视化效果，业主更关注项目建设成本与交付周期，不愿意为数字化设计支付溢价费用；第二，部分业主对 BIM 消防设计存在抵触心理，三维参数化模型能够完整暴露设计隐患、细化消防配套工程量，相较于模糊的二维图纸，可精准核算消防专项造价，极易打破业主低成本建设的诉求，因此主动规避 BIM 正向消防设计模式；第三，业主方需求同质化严重，多数业主仅要求设计成果满足基础消防报审合规即可，无性能化风控、全生命周期资产留存、应急仿真推演等高阶需求，BIM 消防设计的技术优势无法匹配业主基础需求，技术落地缺乏市场驱动力。

与此同时，不同层级业主的审查标准不统一，部分政府项目业主对 BIM 消防模型的交付格式、属性字段、仿真深度无明确要求，设计单位只能盲目输出成果，交付后反复整改适配业主个性化需求，额外增加项目运营成本，进一步恶化市场化落地环境。

行业层面配套规范空白、软件兼容性差、本土化数据库缺失构成 BIM 消防设计落地的技术壁垒；设计单位内部条块化组织架构、岗位职能割裂、激励考核机制缺位，形成阻碍数字化转型的内部组织阻力；高额转型成本、短周期市场节奏、业主方认知偏差与需求约束，从外部市场化层面限制技术规模化普及。多重阻力相互叠加，共同延缓国内建筑设计行业消防板块数字化转型进程。只有从技术标准、组织架构、市场化机制三个维度同步发力，补齐行业配套短板、优化内部组织模式、完善市场化盈利生态，才能破除现阶段 BIM 消防设计的发展困局，推动数字化消防设计模式在建筑设计行业全面普及。

第二节 建筑学人才培养中消防与 BIM 知识融合策略

数字化消防正向设计模式的全面落地,核心依托复合型建筑学人才作为支撑,此类人才需同时兼备建筑方案设计思维、专业消防安全知识、BIM 数字化建模与仿真能力,适配新时代建筑消防一体化设计的岗位需求。当前国内高校建筑学专业人才培养体系滞后于行业数字化转型节奏,防火消防课程与 BIM 数字化课程相互独立、理论教学与工程实操脱节、产教融合深度不足,导致行业复合型人才供给缺口持续扩大,成为制约 BIM 消防设计长效普及的深层根源。基于建筑学专业教育现状与行业岗位用人需求,剖析传统人才培养模式的结构性弊端,搭建多维度课程融合体系,完善校企协同实训机制,全方位补齐复合型人才培养短板,为建筑行业数字化消防转型提供坚实的人才储备与智力支撑。

一、传统建筑学消防与 BIM 人才培养现存核心弊端

国内高校建筑学专业经过长期发展,已形成成熟的通识教育、方案设计、施工图绘制、专业选修课四位一体的培养模式,能够满足传统二维设计模式下的基础人才培养需求。但在数字化转型背景下,原有培养体系的结构性缺陷逐步凸显,课程体系割裂化、教学内容滞后化、实训模式单一化问题愈发突出,消防风控知识与 BIM 数字化技能无法实现有机融合,培养出的毕业生存在知识结构断层,难以适配 BIM 消防一体化正向设计岗位的综合用人需求。

(一) 专业课程体系条块分割,学科壁垒根深蒂固

现阶段国内绝大多数开设建筑学专业的高校,均采用分科独立授课的课程设置模式,将建筑学专业课程划分为设计主干课、技术基础课、数字化选修课、通识课程四大独立板块,消防安全类课程与 BIM 数字化类课程分属不同教学教研室,课程大纲独立编制、教学团队相互独立、考核标准互不兼容,二者之间无交叉教学内容,形成根深蒂固的学科壁垒,无法实现知识融会贯通。

消防安全相关课程主要包含《建筑防火设计》《建筑安全与防灾》《特种建筑消防设计》等必修与选修课程,归属于建筑技术教研室授课,教学重心集中在国家防火规范条文解读、被动防火构件选型、防火分区划分原则、疏散体系基础设计等理论内容,课程授课形式以理论讲授、图纸案例分析为主,极少涉及火灾动态仿真、性能化风控设计、数字化模型校验等前沿内容;BIM 数字化相关课程

涵盖《BIM 基础建模》《数字化建筑设计》《参数化设计应用》，归属于数字化设计教研室，课程教学聚焦 Revit、Grasshopper 等软件操作、三维模型搭建、简单参数化优化，授课重点偏向软件实操，仅少量讲解通用建筑设计逻辑，完全未涉及消防构件建模、防排烟系统仿真、耐火参数录入等专项消防内容。

在该分割式课程体系下，学生形成两极分化的知识结构：擅长方案设计的学生熟练掌握建筑布局逻辑与基础防火规范，但缺乏数字化建模与仿真能力，无法开展 BIM 正向消防设计；精通 BIM 软件操作的学生能够完成高精度三维建模，但消防安全知识储备薄弱，不具备独立完成合规消防设计的专业能力。课程壁垒直接造成人才知识结构碎片化，从人才培养源头制约复合型人才产出。

（二）教学内容滞后行业发展，适配性严重不足

建筑行业数字化技术与消防规范处于动态更新状态，新型防火材料、智能消防设备、BIM 仿真工具、性能化设计条文持续迭代，对建筑学专业学生的综合能力提出更高要求。反观高校教学内容，教材更新周期漫长、课程案例老旧、实操内容单一，整体滞后行业发展 3—5 年，无法匹配现阶段 BIM 消防一体化设计的岗位实操需求，教学适配性短板日益凸显。从教材与理论教学层面分析，现阶段高校所用《建筑防火设计》教材多以指令性二维防火设计规范为核心编制依据，侧重讲解传统平面防火分区划分、疏散距离管控等基础内容，未增设 BIM 性能化防火模拟、动态烟气疏散仿真、智能消防系统联动设计等适配数字化模式的教学章节；BIM 相关教材内容同质化严重，以通用建筑建模教学为主，缺少消防机电设备族库创建、防火构件参数化绑定、多专业消防协同设计等专项实操内容，学生即便完成全部课程学习，也无法独立开展消防专项 BIM 设计工作。同时教材更新周期普遍长达 5—8 年，无法同步更新新版防火规范、新型仿真软件操作流程，理论教学与行业实际严重脱节。从课程案例教学层面分析，教师课堂所用教学案例多为老旧低层住宅、常规中小型公共建筑，案例结构简单、消防体系单一，未覆盖超高层综合体、地下立体空间、老旧街区改造等高难度项目；且案例仅提供二维平面图纸，无配套完整 BIM 消防模型、仿真分析报告，学生无法直观学习复杂建筑的 BIM 消防一体化设计逻辑，面对市场化复杂项目时缺乏解决实际问题的能力，毕业生上岗后需要企业投入 3-6 个月重新培训，大幅增加用人单位的人才培养成本。

（三）复合型人才产出不足，行业供需矛盾激化

课程体系割裂、教学内容滞后直接引发行业复合型人才供需失衡问题，结合 2025 年建筑行业人才调研报告数据显示，国内头部建筑设计院、数字化设计专项企业对于 BIM 消防复合型人才的需求量突破 3.2 万人，但全国高校建筑学专业每年可输出的合格复合型人才不足 6000 人，人才缺口长期处于高位，供需矛盾已经成为制约行业数字化转型的软性核心阻力。

从供给端层面来看，受限于老旧课程体系，国内高校建筑学专业毕业生普遍存在能力短板，仅有不足 15% 的学生能够同时熟练掌握消防安全规范与 BIM 消防建模技能，绝大多数毕业生只能适配传统二维消防设计岗位，无法参与正向数字化设计工作；同时高校未设置复合型人才专项培养方向，无对应的分层培养方案，无法批量产出适配不同岗位层级的数字化消防人才，供给总量与质量双低。从需求端层面来看，随着多地住建部门推行 BIM 消防模型强制报审政策，越来越多设计单位、建设单位、运维企业增设 BIM 消防设计师、仿真分析师、协同设计专员等全新岗位，岗位数量逐年递增，人才需求持续扩张。供需失衡进一步引发行业连锁问题，一方面复合型人才薪资溢价持续走高，中小型设计单位无力承担高薪成本，无法组建数字化消防设计团队；另一方面头部企业高薪垄断优质人才，加剧行业资源分配不均的现状，延缓全行业数字化转型节奏。除此之外，人才缺口倒逼企业自主开展内部培训，但企业培训偏向实操技巧，缺乏系统化理论支撑，培养出的人才综合素养参差不齐，无法从根源上解决复合型人才短缺问题。

二、建筑学专业消防与 BIM 融合课程体系搭建

破解复合人才培养困境的核心抓手，是重构适配数字化时代的建筑学专业课程体系，打破原有学科壁垒，以行业岗位能力需求为导向，统筹优化课程架构、更新教学内容、增设交叉教学模块、调整考核评价标准，将 BIM 数字化建模、火灾仿真分析、性能化防火设计全方位融入建筑学主干课程，构建分层化、交叉化、一体化的复合型课程培养体系，实现消防知识与 BIM 技能双向融合、同步教学。

（一）重构分层化交叉课程整体架构

结合建筑学专业四年制、五年制培养周期，按照基础认知、技能进阶、综合应用三个层级，重构交叉型课程整体架构，由浅入深完成消防知识与 BIM 数字

化技能的融合教学,适配不同年级学生的知识接受能力,规避一次性高强度交叉教学带来的学习负担过重问题,兼顾教学质量与学习效率。

基础认知层级面向大一、大二低年级学生,依托通识基础课程完成启蒙教学,在《建筑初步》《建筑构造》等基础课程中,增设基础防火构件认知、简易防火分区划分、基础 BIM 建模等轻量化交叉知识点,让学生初步掌握基础防火材料属性、被动防火设计逻辑、简易构件建模方法,建立数字化消防设计基础认知,为后续高阶课程学习筑牢根基;技能进阶层级面向大二、大三核心培养阶段,新增《BIM 消防一体化设计》《性能化建筑防火》两门专属交叉必修课,同步改造原有《建筑防火设计》《参数化数字化设计》课程,剔除老旧冗余内容,新增火灾动态仿真、消防设备族库创建、多专业协同建模、合规性模型校验等核心教学模块,系统性传授复合型专业技能;综合应用层级面向大四、大五毕业班学生,依托毕业设计、专项选修课,引导学生自主完成完整 BIM 消防一体化设计项目,涵盖方案阶段防火优化、施工图阶段消防建模、竣工阶段仿真验算,全方位提升学生综合实操能力。

同时优化教研室组织模式,打破原有教学部门壁垒,组建跨教研室交叉教学团队,由建筑技术教研室教师负责消防规范与风控理论授课,数字化教研室教师负责 BIM 软件实操教学,双教师协同授课、联合出题、共同考核,从教学组织层面保障交叉课程落地效果。

(二) 更新核心课程融合教学内容模块

以行业现行防火规范、主流 BIM 消防设计软件、市场化项目作业流程为基准,全面更新主干课程教学内容,淘汰老旧二维导向的冗余知识点,新增性能化防火设计、动态烟气疏散模拟、消防 BIM 协同建模三大核心融合模块,实现理论知识与数字化实操深度绑定,同步补齐教材滞后、内容老旧的教学短板。

性能化防火设计模块适配方案设计阶段教学,摒弃传统单一指令性规范灌输模式,结合大型公共建筑、地下空间等复杂业态案例,讲解指令性防火设计与性能化防火设计的差异化应用场景,传授防火分区弹性优化、构件耐火极限动态验算、非常规空间疏散路径优化等前沿知识,配套讲解 PyroSim、Pathfinder 仿真软件的基础操作,让学生掌握通过仿真数据判定消防设计合规性的核心能力;动态烟气疏散模拟模块聚焦灾害工况分析,围绕火灾升温曲线、烟气蔓延规律、人员疏散影响因素两大核心内容,开展仿真对比教学,引导学生通过调整建筑布局、

优化防火分隔、增设应急设施,降低火灾工况下人员伤亡风险;消防 BIM 协同建模模块侧重施工图阶段实操教学,细分被动防火构件建模、主动消防设备族库搭建、多专业协同碰撞校核、模型参数批量录入四个子模块,规范消防模型建模标准,让学生熟练掌握一体化建模全流程作业技巧。

此外,高校联合行业头部设计院、BIM 技术服务商,共同编制《BIM 消防一体化设计实务》配套校本教材与实训指导书,同步更新配套教学课件、仿真案例库、标准化构件族库,填补国内交叉学科教材空白,为融合教学提供完善的教学资源支撑。

（三）优化复合型人才考核评价机制

适配全新交叉课程体系,同步改革传统单一化考核模式,摒弃以卷面考试、手绘图纸为核心的评价方式,建立“理论考核+软件实操+项目设计”三位一体的复合型考核评价机制,全方位考核学生消防理论储备、BIM 实操能力、综合设计能力,以考核倒逼学生主动平衡两类知识学习,提升复合型培养成效。

理论考核占比 30%,考核内容不再局限于老旧规范条文背诵,重点考察学生对性能化防火设计逻辑、火灾蔓延机理、BIM 消防数据传递原理、多专业协同设计规则等综合性理论知识的理解与应用能力,题型以案例分析、方案简答、设计优化为主,弱化机械式记忆考核;软件实操考核占比 40%,采用限时上机考核模式,要求学生在规定时间内完成指定建筑的防火构件建模、消防设备布设、火灾疏散仿真、参数合规性校验,考核学生软件熟练度与精细化设计能力;项目设计考核占比 30%,以中小型公共建筑为命题载体,要求学生输出完整的建筑方案、BIM 消防模型、仿真分析报告、优化整改方案,综合评价学生一体化设计思维与问题解决能力。

同时建立动态考核反馈机制,考核结束后教师针对学生薄弱知识点进行专项复盘辅导,定期更新考核题库,引入行业真实项目真题,保障考核内容与行业岗位需求高度适配,提升人才培养精准度。

三、基于校企协同的 BIM 消防一体化实训模式完善

实训教学是衔接高校理论教育与行业岗位实操的关键纽带,也是提升学生 BIM 消防综合实操能力的核心环节。针对传统实训模式案例老旧、实训场景单一、师资力量薄弱、产教脱节的痛点,依托城乡真实工程项目资源,搭建多层次校企

联合实训平台,完善阶梯式实训内容,组建双师型实训教学团队,构建覆盖基础实训、专项实训、综合顶岗实训的全链条产教融合体系,缩短学生岗位适配周期,从实操层面完善复合型人才培养闭环。

（一）搭建多层次校企协同实训共享平台

由高校牵头,联动本地建筑设计研究院、数字化 BIM 科技企业、城投建设平台、消防专项运维企业,共建校内数字化实训实验室、校外专项实训基地两级实训平台,整合校企双方优质资源,实现教学资源、项目资源、师资资源双向共享,破解单一高校资源不足、实训场景单一的行业痛点,全方位支撑 BIM 消防一体化实训教学。

校内实训实验室依托高校数字化教学楼进行改造升级,企业方无偿提供正版 BIM 建模软件、火灾仿真插件、高性能图形工作站,并协助搭建云端协同实训服务器,配套标准化消防构件族库、全类型工程实训案例库;高校负责场地建设、日常运维与基础教学管理,主要用于低年级基础建模实训、课堂随堂实操、期末上机考核,满足常态化基础实训教学需求。校外专项实训基地依托合作设计单位、建设企业搭建,按照岗位职能划分 BIM 消防建模实训岗、仿真分析实训岗、多专业协同设计岗、消防报审辅助岗四大实训板块,面向毕业班学生开放,用于开展高阶综合顶岗实训,让学生沉浸式体验真实岗位作业流程。

同时搭建线上云端共享平台,校企双方同步上传实训课件、项目图纸、完整 BIM 消防模型、优秀实训作业,打破时空限制,学生可随时随地调取行业真实项目资源开展自主实训;企业工程师可线上批阅学生实训作业、解答实操难题,拓宽实训教学覆盖范围,提升资源利用效率。

（二）制定阶梯式真实项目实训教学内容

为适配不同年级、不同能力层级学生的实训需求,依托校企合作单位提供的城乡真实建筑项目,按照由易至难的原则,制定入门级、进阶级、综合级三级阶梯式实训内容,覆盖低层民用建筑、高层公共建筑、地下综合体、老旧街区更新改造四大主流项目类型,彻底摒弃虚拟简易案例,实现所有实训项目实景化、市场化。

入门级实训面向大二学生,以村镇自建民居、小型社区配套用房、低层商铺等简易项目为载体,实训内容聚焦基础防火分区划分、被动防火构件 BIM 建模、基础疏散路径规划,夯实学生建模基本功与基础防火设计能力;进阶级实训面向

大三学生，以高层住宅、中小型商业综合体为实训载体，重点开展消防机电设备族库创建、喷淋与防排烟系统一体化建模、常规工况火灾仿真模拟、模型合规性校验等专项实训，强化学生交叉实操能力；综合级实训面向大四、大五毕业班学生，选取超高层写字楼、地下立体车库、老旧街区改造等高难度真实项目，模拟设计单位完整作业流程，要求学生以小组为单位，分工完成方案防火优化、施工图消防建模、多工况仿真验算、报审资料编制全流程作业，全方位复刻企业岗位工作内容，提升学生团队协作与综合设计能力。

除此之外，校企联合定期举办 BIM 消防一体化设计专项竞赛，以市场化真实项目为竞赛题目，设置现金奖励、企业实习 offer、专项证书等激励福利，以赛促学、以赛促练，充分调动学生实训积极性，筛选优质复合型储备人才。

（三）打造双师型实训师资与长效保障机制

师资队伍是保障校企实训模式落地成效的核心支撑，针对现阶段高校专任教师普遍缺乏一线工程实操经验、企业工程师理论授课能力不足的双重短板，打造校内专任教师+企业特聘工程师的双师型实训教学团队，分工协作完成实训教学、作业辅导、项目评审等相关工作。

校内专任教师侧重理论教学与基础实操辅导，主要负责讲解消防设计理论、BIM 建模底层逻辑、课程考核标准，同时定期派遣教师入驻合作企业开展挂职实训，参与真实项目 BIM 消防设计作业，补齐一线实操经验短板；企业特聘工程师均为从业五年以上的资深 BIM 消防设计师、仿真分析师，负责高阶实训项目实操指导、行业前沿技术分享、毕业设计评审，同步为学生讲解行业最新规范、主流设计技巧、岗位从业痛点，缩小教学与行业的差距。同时高校常态化组织双师团队教研交流会，统一实训教学大纲、优化实训教案，协调解决实训教学过程中的各类问题，保障教学标准统一。为保障实训模式长效稳定运行，校企双方签订常态化合作协议，明确双方权责、资源投入、人才分配机制；设立专项实训管理小组，统筹实训排班、师资调度、学生安全管理；建立实训质量评价体系，从实训完成质量、岗位适配度、学生满意度三个维度，定期复盘实训成效，动态优化实训项目与教学方案，形成完整的产教融合闭环，为复合型人才长效化产出提供制度保障。

传统建筑学专业人才培养模式存在课程体系割裂、教学内容滞后行业发展、复合型人才供给缺口巨大等多重弊端，无法适配 BIM 消防一体化设计行业的用

人需求；通过重构分层化交叉课程架构、更新融合型教学内容、优化三位一体考核机制，可打破学科壁垒，从理论教学层面实现消防知识与 BIM 数字化技能深度融合；依托多层次校企协同实训平台、阶梯式真实项目实训内容、双师型师资保障体系，能够补齐学生岗位实操短板，完善复合型人才全周期培养闭环。整套融合培养策略能够系统化解行业复合型人才供需矛盾，从人才源头破除 BIM 消防设计规模化落地的软性阻力，为建筑设计行业数字化消防转型、建筑学专业教育改革提供可落地、可复制的标准化实施范式。

第三节 设计团队协作文化的重塑：消防工程师与建筑师

数字化正向消防设计的落地不仅依赖软件工具、行业规范与硬件设备的迭代升级，更深层次取决于设计企业内部组织协作模式与专业文化理念的革新。长期以来，国内建筑设计行业延续二维图纸时代串行化作业思维，建筑师与消防工程师长期处于业务割裂、思维分化、目标错位的协作状态，前期重空间造型、后期被动补齐消防条款的后置校核模式，不仅拉长项目设计周期、增加图纸返工率，也从根源上限制 BIM 一体化协同设计模式的推广。基于建筑学组织变革视角，剖析传统串行设计模式的内在弊端，依托 BIM 协同平台搭建并行化作业机制，并建立适配多专业融合的绩效考核体系，重塑跨专业协作文化，培育防火性能前置、空间与安全共生的一体化设计思维，是破解专业壁垒、实现消防设计数字化转型的核心内部路径。

一、传统设计模式下建筑与消防专业协作弊病

我国建筑设计行业历经数十年发展，形成了一套适配二维施工图体系的标准化作业流程，该流程以建筑方案为绝对核心，结构、机电、消防等配套专业全部处于从属与被动适配地位。在行业发展初期，该模式能够快速适配粗放式建设需求，但随着现代建筑业态复杂化、消防规范精细化、工程管控数字化，传统后置校核式设计模式的结构性病病被不断放大，专业内耗、方案反复修改、安全与美学失衡等问题常态化出现，同时与 BIM 并行协同的底层逻辑形成根本性冲突。

（一）建筑师主导的串行化作业流程运行逻辑

传统建筑工程项目普遍采用单向串行的线性作业流程，整体流程按照“建

筑方案构思—平面立面深化—结构体系匹配—机电消防专项深化—施工图汇总报审”的顺序逐层推进，各专业按照固定时序依次介入项目设计，不存在跨专业同步协作的作业环节。在此模式体系之内，建筑师掌握项目前期的绝对话语权，负责确定建筑整体造型、内部业态布局、空间尺度关系、整体动线规划等核心内容，方案定稿之后直接向下游专业交付设计成果，下游专业仅能够在既定框架内完成配套深化，无权反向干预建筑整体布局与空间形态。

从消防设计介入时序层面进行分析，消防相关工作全部集中在设计中后期阶段。在概念方案阶段与总体规划阶段，设计团队仅考虑建筑容积率、外立面美学、商业利用率、空间舒适度等指标，极少将防火分区划分、疏散距离约束、消防车道路布设、防排烟系统布局等消防安全要素纳入前期研判范畴；直至建筑平面方案完全定稿，专职消防工程师才正式介入项目，依据现行防火设计规范，对既有平面进行合规性校核，并通过增设消防设备、调整局部隔墙、压缩使用空间等方式，弥补前期方案存在的先天性消防缺陷。这种“先造型、后消防”的作业思维，本质上是将消防设计定义为附属配套工作，而非建筑整体设计的核心组成部分，长期固化之后便形成重造型、轻安全的行业固有设计文化。对于常规低层民用建筑、小型配套建筑而言，建筑结构简单、业态单一、消防约束条件较少，后置式消防校核模式基本可以满足报审需求。但针对超高层综合体、地下立体商业空间、复合型文旅建筑等复杂现代化建筑，此类建筑空间流线交错、功能分区繁杂、人员荷载基数庞大，前期空间布局直接决定整体防火体系的稳定性，单一依靠后期微调设备点位无法解决先天性安全隐患。串行化流程在复杂项目中暴露出的短板愈发明显，已然无法适配现代化建筑消防设计的管控要求。

（二）消防后置校核引发的方案反复迭代与资源内耗

后置式消防校核模式最直观的弊端，在于大幅提升项目返工概率，造成设计工时冗余内耗、项目交付周期不可控等一系列管理问题。在串行作业逻辑下，建筑方案完成定稿后，一旦消防工程师校核发现方案存在疏散距离超限、防火分区面积超标、消防救援面缺失、封闭空间排烟条件不足等原则性问题，就必须退回建筑专业进行平面整改。由于消防安全问题大多涉及整体空间布局与业态排布，局部微调无法实现合规整改，往往需要建筑师推翻原有平面布局，重新开展方案设计，引发全专业连锁返工。结合国内大中型设计院项目调研数据可知，在传统二维串行模式下，约 65% 以上的公建类项目会因消防合规性问题出现至少一次

方案级别的返工；超高层与地下综合体项目返工率高达 92%，平均返工次数维持在 2 至 4 次区间。每一次方案返工，不仅意味着建筑专业需要重新绘制平面图纸、优化外立面造型，结构、给排水、暖通电气等配套专业均需要同步更新施工图，极大增加团队整体设计工时。从成本维度分析，消防后置校核造成的方案反复修改，平均会消耗项目整体 18% 至 25% 的设计成本，同时导致交付周期延长 15% 以上，在短周期快周转的市场化大环境下，极易引发工期违约、业主投诉等衍生问题。除此之外，高频次的方案迭代还会造成设计团队内部矛盾激化。在项目交付工期紧张的前提下，反复整改会加剧建筑师与消防工程师之间的对立情绪：建筑师认为消防条款过度制约空间美学与业态布局，限制方案创作自由度；消防工程师则认为前期方案缺乏基础防火思维，额外增加后期校核与整改压力。长期的矛盾积累进一步加深专业隔阂，形成互相推诿、消极协作的不良团队氛围，从组织文化层面阻碍一体化设计模式的落地实施。

（三）专业目标错位引发安全与美学的二元对立

在传统协作文化影响下，建筑师与消防工程师形成差异化甚至相互冲突的价值评判体系，目标错位直接造成建筑空间美学、使用功能与消防安全长期处于二元对立状态，难以实现协同统一。对于建筑学从业者而言，设计核心目标集中于空间形态塑造、建筑美学表达、业态利用率最大化、使用者体验优化等层面，追求建筑造型独特性、内部空间完整性与商业价值最大化；对于专职消防工程师而言，岗位职责以满足消防报审合规为第一优先级，一切设计动作围绕防火规范条文展开，优先保障建筑火灾抵御能力与人员疏散安全性，对空间造型与美学价值关注度较低。

目标导向的差异性，使得两类专业人员在设计决策中频繁产生分歧。在方案博弈过程中，若项目偏向商业开发属性，业主方更加注重空间利用率与建筑外观，往往会弱化消防约束条件，倒逼消防工程师妥协，采用低标准消防配置换取更大的商业空间，埋下隐性消防安全隐患；若项目偏向公共安全属性，设计方案严格遵循高标准防火管控，消防工程师话语权提升，大量防火墙、设备机房、疏散楼梯、消防设备占用有效使用空间，最终导致建筑空间碎片化、造型同质化，丧失建筑学设计美感。

二元对立的底层根源，在于传统模式缺少能够统筹两类专业目标的协同载体与统一评价标准，无法在方案前期完成美学、功能、安全三者之间的平衡优化。

而 BIM 数字化平台凭借三维可视化、性能仿真预判、多方案比选的核心优势，能够有效破解二者对立困局，但受限于老旧协作文化与串行作业惯性，其协同价值始终无法得到充分发挥。

二、基于 BIM 协同平台的多专业并行工作机制构建

BIM 协同平台区别于传统图纸交付模式的核心优势，在于打破时序壁垒与空间壁垒，支持多专业人员基于同一基准模型同步开展设计作业。以消解专业隔阂、前置消防设计环节、平衡多元设计目标为导向，重构适配 BIM 生态的并行化工作机制，明确不同设计阶段建筑师与消防工程师的介入节点、权责边界与协作内容，实现建筑造型设计、防火性能验算、结构安全校核、机电消防布局同步推进，从作业流程层面彻底摒弃后置校核模式，重塑一体化协同作业新格局。

（一）统一云端协同基准与分层权限体系

并行化协同设计落地的基础前提，是搭建统一的云端 BIM 协同管理平台，实现多专业模型同源、数据同步、版本可控。平台以单一集成化 BIM 模型作为项目所有专业的唯一设计基准，替代传统分散式二维图纸文件，所有参与项目的设计师、消防工程师、结构工程师均可依托云端服务器，实时调取、更新、同步模型数据，从根源上杜绝图纸版本混乱、信息不对称、参数不统一等协同通病。

为保障并行作业有序推进，需依据岗位职责划分精细化分层权限体系。项目总负责人拥有最高管理权限，负责统筹模型整体版本、审批重大方案变更、协调专业矛盾；建筑师主要负责建筑外轮廓造型、楼层平面布局、被动防火构件布设、疏散路径总体规划，拥有建筑模型底层结构的编辑权限；消防工程师重点负责防火分区精细化拆分、主动消防设备建模、火灾性能仿真与合规性校验，可针对消防相关区域提出模型修改意见，并对建筑平面中涉及消防安全的关键节点拥有一票否决权；其余机电、结构专业人员仅可编辑对应专业构件，无权擅自改动建筑防火布局。权限划分打破建筑师单一主导的老旧格局，赋予消防专业前期参与权与决策权，平衡两类岗位话语权。同时平台内置版本回溯与变更记录功能，自动留存每一次模型修改的操作人员、修改时间、变更内容，一旦出现设计问题可快速溯源定位责任主体，解决传统模式下责任推诿、变更无记录的管理难题，为并行化协同模式提供制度支撑。

（二）全设计周期消防专业前置介入机制

重构并行作业流程的核心，是调整消防专业介入时序，将消防设计工作由中后期后置校核，转变为全周期前置融合，让防火性能约束深度融入概念方案、总体规划、施工图深化三大核心阶段，实现空间设计与防火设计同步迭代、双向优化。

在概念方案阶段，消防工程师同步参与建筑场地选址、楼栋排布、整体动线规划研讨工作，结合场地周边消防救援条件、市政供水布局、外部防火间距规范要求，从宏观层面给出合理化布局建议；依托 BIM 仿真工具，预判不同布局方案下室外火灾蔓延风险、消防车通达性，辅助建筑师筛选兼顾美学、功能与安全的最优总体规划方案。在平面方案阶段，消防工程师与建筑师同步开展平面布局设计，同步完成防火分区初步划分、疏散楼梯点位布设、消防车道适配规划，针对异形空间、大跨度中庭、地下封闭区域等高危部位，提前进行疏散仿真模拟，规避先天性设计缺陷。

在施工图深化阶段，两类专业人员协同完成精细化模型打磨，建筑师负责微调平面业态、优化外立面细节；消防工程师同步完成喷淋系统、报警系统、防排烟系统一体化建模，实时检测管线与防火隔墙、疏散通道的碰撞冲突，联动建筑师优化局部平面，实现建筑造型、空间功能、消防安全双向适配。全周期前置介入机制彻底颠覆线性串行流程，将消防校核由被动整改转变为主动共创，大幅降低方案返工频率。

（三）多方案联动比选与协同优化流程

依托 BIM 平台的仿真分析与多方案管理功能，建立标准化联动比选流程，针对项目关键设计节点，同步生成多套差异化设计方案，从空间美学、商业利用率、耐火性能、疏散安全、工程造价五个维度开展综合评分，筛选最优一体化设计方案，破解美学与安全二元对立难题。

针对建筑外立面与整体造型节点，平台同步生成简约型、艺术型、复合型三类造型方案，消防工程师同步对每套方案开展外部防火间距验算、外立面阻燃性能校核、竖向火灾蔓延仿真，剔除防火风险过高的畸形造型方案，在满足消防安全底线的前提下，最大化保留建筑美学价值；针对内部平面布局与防火分区节点，建筑师提供多种业态排布方案，消防工程师依托性能化模拟工具，测算不同方案的人员疏散时长、烟气蔓延速度、高危区域荷载系数，结合评分模型量化各项指标，平衡空间利用率与消防安全指标。

此外,针对方案博弈过程中出现的专业分歧,建立三级协商解决机制:一级层面由建筑师与消防工程师自主协商优化;二级层面联合结构、机电专业共同研讨,综合多方意见优化方案;三级层面由项目总负责人结合仿真数据与量化评分,做出最终决策。以客观仿真数据替代主观经验博弈,化解专业对立矛盾,培育协同共赢的作业氛围。

三、跨专业协同考核机制与一体化设计思维培育

作业流程重构仅能从表层层面优化协作模式,想要从根本上重塑团队协作文化,必须配套适配 BIM 一体化设计的考核激励体系,打破传统按专业独立考核、按出图量结算薪酬的老旧模式,建立以项目整体成果为核心、以协同质量为辅的复合型考核标准,引导全员转变固有设计思维,弱化专业本位主义,逐步培育防火性能优先、空间安全共生的一体化设计思维,实现协作模式与团队文化双向革新。

(一) 破除专业本位的复合型绩效考核体系

传统绩效考核体系以单一专业出图量、图纸完成速度作为核心考核指标,薪酬结算与专业独立工作量直接挂钩,该考核模式引导设计师优先考虑本专业工作效率,忽视跨专业协同质量与项目整体品质,是滋生专业壁垒、本位主义的制度根源。为此,需重构复合型考核体系,将考核指标划分为项目综合指标、专业协同指标、单项业绩指标三大板块,重新定义绩效分配逻辑。项目综合指标占比 50%,面向项目全体设计人员进行统一考核,考核内容包含项目返工率、消防报审一次性通过率、业主综合满意度、方案落地适配度,该指标将建筑师与消防工程师的绩效深度绑定,促使全员以项目整体最优为设计目标,摒弃单一专业利己思维;专业协同指标占比 30%,重点评价设计师跨专业配合效率、模型变更响应速度、矛盾协商配合度、前置设计参与积极性,倒逼设计师主动适配并行化作业模式,提升团队协同效率;单项业绩指标占比 20%,保留原有出图质量、工期完成度等基础考核内容,兼顾基础作业产出,保障考核体系平稳过渡。

在绩效分配层面,同步改革薪酬发放规则,设立一体化协同专项奖金,针对报审零返工、高质量落地的标杆项目,给予团队全员额外奖励;对于因本位主义、消极协作导致项目返工、工期延误的人员,扣除对应绩效分值,从奖惩机制层面引导全员适配一体化协同文化。

（二）建立常态化跨专业交流培训机制

专业知识壁垒是阻碍协同文化形成的底层诱因，多数建筑师缺乏消防系统基础知识，无法理解防火约束背后的安全逻辑；消防工程师缺少空间设计思维，难以平衡防火规范与空间美学需求。通过常态化跨专业交流、交叉技能培训，补齐双方知识短板，提升全员综合认知水平，为一体化设计思维培育筑牢认知基础。设计企业需要定期组织内部交叉培训活动，采用双向授课模式丰富培训内容。由资深消防工程师面向全体建筑师开展专题讲座，讲解火灾蔓延机理、核心防火规范底层逻辑、主动消防系统布设原理，让建筑师理解消防条款的约束意义，在方案前期自主规避基础性消防隐患；由首席建筑师面向消防工程师分享空间设计基础知识、建筑美学创作逻辑、商业业态布局原则，帮助消防工程师跳出纯规范思维，在深化设计阶段兼顾空间完整性与使用体验。

除此之外，定期组织跨专业复盘研讨会，选取企业内部已落地的成功与失败项目，组织两类专业人员共同复盘项目设计全过程，分析过往协作痛点、方案返工诱因、设计决策优劣，总结一体化协同设计的实操经验；同步开展跨专业联合设计竞赛，以小组为单位，强制搭配建筑师与消防工程师组队参赛，在竞赛实操中磨合协作模式，潜移默化消解专业隔阂。

（三）培育防火前置的一体化集体设计思维

协作文化重塑的最终落脚点，是培育全员统一的集体设计价值观，彻底摒弃“建筑为主、消防为辅”的老旧思维，确立“安全为底线、美学为载体、功能为核心”的一体化设计理念，将消防安全性能纳入建筑方案顶层设计，实现消防安全由附属配套属性升级为建筑核心属性。

从企业管理层面，需要将一体化设计思维纳入企业设计标准与发展战略，明确规定所有大中型公建项目必须采用 BIM 并行协同模式，消防专业全程前置介入；在项目评审阶段，将防火性能评分提升至与美学评分、功能评分同等权重，从顶层制度层面确立消防安全的战略地位。从基层设计层面，引导设计师转变固有设计认知，让建筑师将防火分区、疏散体系、消防车道的视为建筑空间的组成部分而非外部约束；让消防工程师跳出条文主义思维，以优化整体建筑品质为目标开展合规性设计，实现两类岗位思维同频、目标统一。

与此同时，树立企业内部标杆项目，将一体化协同落地效果优异、安全与美学高度统一的项目作为全员学习范本，依托标杆项目示范效应，加速新型设计文

化传播，逐步替代传统串行作业文化，形成互帮互助、双向赋能、整体最优的良性团队协作生态。

传统串行化作业流程、后置式消防校核模式，不仅造成项目反复迭代、设计资源内耗，还引发建筑师与消防工程师价值目标错位，形成根深蒂固的专业壁垒与对立型协作文化；依托云端 BIM 协同平台重构并行化作业机制，推动消防设计全周期前置介入，能够从流程层面解决方案返工、专业对立等显性问题；通过复合型绩效考核、常态化交叉培训、价值理念重塑，可从文化层面破除专业本位主义，培育防火性能前置的一体化设计思维。流程革新与文化重塑双向结合，能够全方位优化设计团队内部协作生态，为 BIM 消防一体化正向设计模式规模化落地提供稳定的组织保障。

第四节 政策、市场与标准对建筑设计消防范式的影响

建筑消防设计范式的迭代升级，并非单纯由技术革新与企业内部组织变革驱动，而是国家宏观政策、行业市场化需求、标准化规范体系三方要素共同耦合作用的结果。相较于企业微观层面的转型优化，政策、市场、标准从行业顶层维度调控行业发展方向，决定 BIM 数字化消防设计范式的转型节奏与普及上限。结合国内数字建造政策导向、城乡建筑市场差异化需求、消防设计标准发展现状，剖析三方要素对传统消防设计范式向数字化性能化范式转型的驱动与约束作用，并针对性提出标准化完善策略，能够从宏观层面完善数字化消防转型生态，自上而下推动行业整体完成范式升级。

一、国家顶层政策对消防设计范式转型的导向作用

国家及地方层面出台的数字建造、智慧消防、建筑防灾相关政策文件，是引导行业转型升级的核心指挥棒。近年来住建部、应急管理部连续发布多项扶持政策，明确提出推广 BIM 正向设计、普及性能化防火模拟、完善智慧消防治理体系，从顶层设计层面明确消防数字化转型的发展方向，通过行政强制、政策扶持、资金补贴、试点示范等多重手段，倒逼传统二维消防设计模式迭代升级，为新型消防设计范式普及提供制度推力。

（一）数字建造战略下 BIM 全生命周期推广政策

自“十四五”数字经济发展规划发布以来，建筑业数字化转型上升为国家级发展战略，数字建造、智能建造成为建筑业高质量发展的核心关键词，各级政府陆续出台专项政策，将 BIM 技术推广纳入建筑行业考核指标，逐步扩大 BIM 技术强制应用范围，为 BIM 消防设计范式转型奠定政策基础。

国家住建部先后印发《智能建造与新型建筑工业化协同发展行动计划》《建筑业数字化转型实施方案》等纲领性文件，明确要求超高层建筑、大型公共综合体、地下空间项目全面推行 BIM 正向施工图设计，鼓励设计单位依托 BIM 模型完成防火验算、疏散仿真、性能化评估等专项工作；同时鼓励各省市结合区域建设现状，出台地方性实施细则，针对国有资金投资项目，强制要求交付完整的三维 BIM 消防模型，并同步配套二维报审图纸。从政策覆盖范围来看，现阶段国有投资类公建项目已基本实现 BIM 全覆盖，民营商业项目正在逐步纳入强制应用清单，政策约束力逐年递增。除此之外，各地政府配套出台专项扶持补贴政策，对于积极应用 BIM 消防一体化设计、落地性能化防火模拟的设计单位与建设单位，给予项目造价 1% 至 3% 的数字化专项补贴；对于获评省级、国家级智能建造标杆的消防数字化项目，额外给予企业荣誉奖励与税收优惠，通过正向激励的方式，降低企业数字化转型成本，调动市场主体参与积极性，加速 BIM 消防范式落地普及。

（二）智慧消防建设与性能化设计扶持政策

在公共安全治理层面，应急管理部、国家消防救援局围绕智慧消防体系建设，出台多项政策推动性能化防火设计替代传统指令性设计，破解复杂建筑业态消防设计瓶颈，推动消防设计由经验型、条文型向数据型、仿真型转型升级，重塑新时代建筑消防设计底层逻辑。

传统指令性防火设计以统一硬性指标约束所有建筑类型，适配标准化、常规化民用建筑，但无法适配异形建筑、超大跨度公共建筑、复合型地下空间、历史老旧街区改造等特殊项目。针对此类痛点，国家层面放宽复杂项目性能化设计审批门槛，明确对于超出现行防火规范适用范围、采用传统指令性设计无法平衡安全与功能的特殊建筑，可依托 BIM 火灾仿真、动态疏散模拟等数字化手段，开展性能化消防设计，以仿真数据判定设计方案合规性。该项政策从法律层面赋予 BIM 性能化消防设计合法地位，打破传统规范条文的局限性，拓宽数字化设计模式的应用场景。同时，各地消防救援机构同步升级消防报审平台，搭建数字化智

慧消防审查系统，打通 BIM 模型与报审平台的数据接口，支持设计单位直接上传 IFC 格式消防模型，审查人员依托平台自动完成防火分区校核、疏散距离检测、设备合规性校验，实现消防报审、审查、备案全流程数字化，从审批端倒逼设计企业淘汰老旧二维设计模式，适配数字化新型范式。

（三）政策落地现存约束与区域差异化问题

虽然宏观政策整体导向偏向数字化、性能化消防设计，但现阶段政策落地过程中仍存在区域发展不均衡、配套细则缺失、监管口径不统一等问题，在一定程度上制约新型设计范式全域普及。从区域发展层面分析，我国东部沿海发达省市数字化政策落地力度较强，强制应用范围广、补贴机制完善、审查体系成熟；而中西部欠发达地区政策执行力度偏弱，多数地区仅倡导鼓励应用 BIM 消防设计，未出台强制性落地政策，数字化转型进度缓慢，区域分化现象较为突出。

从政策细则层面分析，国家顶层政策多为纲领性、指导性文件，仅明确转型发展方向，并未细化 BIM 消防模型交付标准、性能化仿真评判阈值、审查责任划分细则；部分省市自行出台地方性细则，标准各不相同，导致跨区域经营的大型设计单位需要适配多套交付标准，增加企业管理成本。此外，性能化消防设计的审批权限划分模糊，住建部门与消防救援部门的审查权责边界尚未完全厘清，部分项目出现重复审查、审批流程繁琐等问题，打击业主方与设计方采用性能化设计模式的积极性。整体而言，国家政策对消防设计范式转型具备绝对主导的正向驱动作用，但仍需统筹区域标准、完善配套细则、统一审查口径，消解政策落地过程中的各类阻碍，最大化释放政策赋能效果。

二、城乡多元市场对数字化消防设计的需求驱动力

市场需求是推动行业范式转型的内生动力，相较于政策外部行政推力，市场化需求能够直接决定设计模式的盈利空间与生存土壤。当前国内建筑市场分化为商业地产开发、城市更新改造、乡村基础设施建设三大细分赛道，不同赛道项目属性、成本诉求、安全标准、建设逻辑存在显著差异，但均对低成本、高安全、可视化的数字化 BIM 消防设计产生刚性需求。多元化市场需求倒逼设计单位更新设计模式，成为消防设计范式迭代升级的核心内生引擎。

（一）商业地产项目提质降本数字化诉求

商业地产涵盖高层写字楼、购物中心、商住综合体、产业园区等市场化盈利

性项目，此类项目以经济效益为核心导向，业主方的核心诉求为压缩建设周期、严控工程造价、最大化商业使用面积、降低后期运营风险，而 BIM 一体化消防设计恰好能够全方位适配商业地产项目提质、降本、增效的核心需求，成为头部地产企业的首选设计模式。

从成本管控维度分析，传统二维消防设计存在图纸错漏碰缺频发、方案返工率高、消防材料浪费等问题，隐性成本居高不下。依托 BIM 一体化消防设计模式，可在设计阶段完成多专业碰撞校核、防火方案仿真比选，提前规避设计缺陷，减少施工阶段设计变更；同时系统能够自动精准统计消防管材、防火板材、消防设备工程量，杜绝超量采购造成的建材浪费，综合测算可知，BIM 数字化模式可帮助商业项目降低 3% 至 8% 的消防专项造价，降本优势十分显著。

从空间利用率维度分析，商业地产项目对平面空间利用率敏感度极高，传统后置式消防设计为满足规范硬性要求，往往需要预留冗余的疏散空间与防火区域，造成有效商业面积浪费。而 BIM 性能化设计能够跳出固定条文约束，结合人流荷载动态模拟疏散工况，在保障消防安全达标的前提下，优化防火分区边界、精简冗余消防配套空间，平均可为综合体项目提升 1% 至 2% 的有效经营面积，直接提升项目整体投资回报率。此外，三维可视化模型可直观展示消防布局与疏散动线，便于业主方前期招商宣传、后期运营管理，附加价值远超传统二维图纸。

（二）城市更新老旧改造项目的风控适配需求

在城市更新战略全面推进的背景下，老旧小区、历史保护街区、老旧工业园区、存量公建改造类项目数量逐年攀升，存量改造市场逐步成为建筑业新的增长极。相较于新建项目，老旧改造项目结构复杂、原始图纸缺失、消防隐患基数大、改造施工约束多，传统二维消防设计无法精准研判存量建筑消防短板，BIM 数字化技术凭借逆向建模、性能检测、隐患仿真预判等优势，成为存量改造项目消防专项优化的最优解。

老旧建筑普遍存在耐火等级偏低、消防通道狭窄、供水管网老化、疏散体系残缺等历史遗留问题，且多数老旧街区原始施工图资料丢失，设计师无法依托传统图纸开展消防校核与改造设计。依托三维激光扫描技术结合 BIM 逆向建模技术，可快速复刻老旧建筑完整三维模型，精准还原墙体结构、管线走向、现有消防设备点位，补齐数据短板；在此基础上开展防火性能衰减验算、火灾蔓延仿真，精准定位存量建筑高危隐患区域，制定低成本、高适配性的靶向改造方案，避免

全域翻新造成的资金浪费。

同时，城市更新项目普遍存在改造资金有限、施工空间狭小、不能全面停工的约束条件，BIM 平台可同步生成多套消防改造方案，对比不同方案的改造成本、施工难度、安全提升效果，择优选择性价比最高的改造策略，兼顾消防安全升级与改造经济性，完美适配存量更新项目的特殊管控需求。

（三）乡村建设场景简易化消防配套设计需求

乡村建设市场与城市建筑市场存在明显差异化特征，乡村自建房、村级公共服务建筑、小型涉农厂房项目体量小、建设预算低、专业人才匮乏、运维能力薄弱，无法照搬城市高标准、高成本的全套 BIM 消防设计体系，但对轻量化、简易化的数字化消防辅助工具存在刚性需求，下沉式市场进一步拓宽数字化消防设计的应用边界。

从乡村消防建设痛点来看，乡村自建房屋型杂乱、防火分隔缺失、村民消防意识薄弱，火灾事故频发；同时乡村项目建设资金有限，业主无力承担高额的专项设计费用，传统精细化 BIM 正向设计模式成本过高，无法适配乡村市场。针对该类特征，轻量化 BIM 消防模板库、简易疏散仿真工具、标准化防火户型库能够有效适配乡村建设需求：设计人员可直接调取标准化乡村建筑 BIM 模型与配套消防布置模板，无需从零开始建模，大幅降低设计工时与服务成本；同时依托简易仿真工具，预判明火蔓延风险，优化民居防火隔断、室外消火栓布设位置，以低成本方式提升乡村建筑基础防火能力。

乡村市场的多元化需求，倒逼行业研发轻量化、普惠化的数字化消防产品，补齐高端数字化工具下沉不足的短板，推动 BIM 消防设计体系分层化、多元化发展，让数字化消防范式覆盖城市新建、城市更新、乡村建设全建筑场景，完善行业整体应用生态。

三、BIM 消防行业标准化体系完善与转型优化策略

统一、完备、本土化的行业标准是维系新型消防设计范式长效运行的底层基石，也是破解跨软件兼容差、模型交付混乱、性能化审查口径不一等行业痛点的根本手段。当前我国 BIM 消防相关标准整体滞后于政策迭代与市场需求，建模细则、交付规范、仿真评判标准、验收准则存在大量空白，标准碎片化问题制约行业高质量转型。立足于行业宏观发展视角，从建模标准、性能模拟标准、交付

验收标准三个维度完善标准化体系，能够统一行业作业基准，加速新旧消防设计范式更替进程。

（一）制定本土化分级 BIM 消防建模实施标准

建模标准是所有数字化消防设计工作的基础，现阶段行业内无统一的消防构件建模细则、LOD 精度分级标准、属性录入规范，不同企业、不同设计师输出的消防模型格式混乱、精度不一，严重影响模型协同、报审与复用效果。由国家住建部门牵头，联合行业协会、头部设计院、BIM 技术服务商，编制全国统一的《建筑消防 BIM 建模技术规程》，明确本土化分级建模标准，能够从源头规范行业作业行为。首先，统一消防构件分类与命名规范，参照国内防火设计规范，将消防模型构件划分为被动防火构件、主动灭火设备、防排烟设备、疏散配套设施四大门类，明确各类构件的命名规则、编码格式、分类层级，实现全行业构件名称统一；其次，制定适配不同应用场景的 LOD 分级建模标准，LOD1 层级适配宏观规划报审，仅录入防火分区、疏散通道等基础轮廓；LOD2 层级适配施工图设计，完善消防管网、设备点位静态参数；LOD3 层级适配性能化仿真与运维管理，绑定设备全生命周期动态属性参数，按需匹配不同项目的建模精度要求；最后，完善本土化构件族库参数标准，统一防火混凝土、阻燃板材、消防水泵、喷淋头等构件的基础属性字段，内置适配国内市场的材料参数库，减少设计师手动录入误差，提升建模标准化程度。

（二）统一性能化消防模拟仿真评判基准

性能化仿真模拟是数字化消防设计的核心环节，现阶段国内暂无统一的仿真边界条件、参数选取规则、结果合规阈值，设计师可自由设定火灾升温曲线、人员荷载、烟气扩散系数等基础参数，参数选取主观性较强，极易出现同一建筑多套仿真结果、数据造假优化方案等乱象，不仅降低性能化设计公信力，也增加审查人员的评判难度，制约性能化范式普及。

针对仿真乱象，需从参数标准与评判标准两个层面完成统一规范。在参数设定层面，依据建筑业态类型，分类规定火灾增长类型、最大热释放速率、初始起火位置、人员密度、环境温湿度、通风边界条件六大核心仿真参数，例如商业综合体统一采用快速增长型火灾曲线，地下空间限定固定起火区域，杜绝人为随意调整参数美化仿真结果；在结果评判层面，明确人员生命安全判定红线，统一最小可用疏散时间、烟气临界高度、有毒气体浓度、环境最高温度四项指标的合规

阈值，所有项目必须严格参照统一红线完成方案校核，超出阈值则判定为方案不合格，从制度层面杜绝虚假仿真、无效仿真问题。

同时，规范仿真软件准入清单，限定官方认可的建模与仿真工具，禁止使用未完成本土化适配、无合规校验机制的小众软件开展报审作业，进一步强化仿真成果的权威性与统一性。

（三）完善模型交付与审查验收配套标准

交付与验收标准是衔接设计端、审查端、建设端的关键纽带，也是打通 BIM 消防模型报审全流程的最后一环。当前各地交付格式、审查流程、验收指标差异化显著，增加跨区域设计企业的转型成本，亟需国家级统一交付验收标准，简化报审流程、统一审查口径，构建标准化数字化报审体系。在交付标准层面，明确统一交付载体与交付内容，规定消防 BIM 模型统一以 IFC 通用格式作为报审载体，配套提交仿真分析报告、工程量清单、构件属性明细表三类附属资料；同时区分新建项目与改造项目的交付内容差异，新建项目需交付完整全专业消防模型，改造项目仅需交付隐患区域逆向模型与改造优化模型，分类降低存量项目交付门槛。在审查验收层面，建立国家级统一数字化消防审查平台，打通住建、消防、水务多部门数据接口，实现一模型多部门共享共用；统一审查流程，推行“线上模型初审+线下资料复核”的一体化审查模式，明确二维图纸与三维 BIM 模型具有同等审批效力，逐步放宽二维图纸强制交付要求，降低设计单位双重出图的冗余负担。建立标准动态更新机制，结合市场新型消防设备、更新后的防火规范、迭代升级的仿真算法，定期修订建模、仿真、交付三类标准内容，保障行业标准时效性与适配性，形成政策引导、市场驱动、标准兜底的全方位转型生态。

国家数字建造与智慧消防相关政策从顶层维度，通过行政强制、资金补贴、审批改革等方式，自上而下引导行业摒弃传统二维后置校核模式，推动性能化、数字化消防设计落地；商业地产、城市更新、乡村建设三大细分市场，基于降本增效、隐患风控、适配建设的多元化诉求，为 BIM 消防范式转型提供源源不断的内生市场动力；完善分级建模标准、仿真评判基准、交付验收规范，能够补齐现阶段行业标准化短板，肃清数字化消防设计推广过程中的各类乱象。政策、市场、标准三者相辅相成、协同赋能，共同推动建筑消防设计范式由经验化二维后置设计，向数据化三维一体化正向设计全面转型，为建筑学行业数字化高质量发展筑牢顶层支撑体系。

第十章 结论与展望：面向智慧建造与乡村未来的建筑消防设计

第一节 主要研究发现与结论总结

结合建筑学营造理论、数字化 BIM 技术、城乡差异化建设逻辑与组织变革管理学相关理论，本研究围绕传统建筑被动防火营造智慧、数字化消防设计转型机理、BIM 正向消防设计落地阻力、复合型人才培养模式、跨专业协同文化重塑以及宏观政策市场适配机制六大板块展开系统性研究，完成从底层理论剖析、现存问题研判、实施路径搭建到顶层生态完善的全链条分析。基于全域研究成果，系统梳理传统营造体系内可复用防火策略，阐释数字化技术赋能消防设计范式升级的内在逻辑，并归纳适配城乡二元化格局、智慧建造发展趋势的消防设计与落地实施方案，可为新时期建筑消防设计创新、老旧建筑防火更新、乡村建筑安全建设提供理论支撑与实践参考。

一、传统建筑营造体系下被动防火设计核心成果归纳

我国传统建筑历经数千年发展，形成了适配木构建筑体系、贴合本土气候特征、兼顾风貌美学与消防安全的被动防火营造体系。该体系区别于现代主动式消防设备灭火逻辑，依托空间规划、材料选型、构造处理、聚落布局四大维度，从源头降低火灾发生概率、阻断火势蔓延路径、延缓灾害扩散速度，是本土化低碳防火设计的宝贵财富。本研究通过梳理古建营造典籍、剖析典型南北传统民居与古公共建筑案例，拆解传统营造智慧的底层防火机理，提炼可适配现代城乡建筑更新、新建项目的复用性设计成果。

（一）传统聚落层级的宏观防火空间规划智慧

传统木质结构建筑耐火性能较弱，火灾连锁蔓延风险远高于现代钢筋混凝土建筑，古代匠人在长期防灾实践中，形成了以聚落整体为单元、以空间分隔为核心的宏观防火规划思维，适配古代村镇、古城街区、大型古建筑群落的防灾需求，

其空间布局逻辑对现代高密度街区、老旧城中村、乡村聚居点的消防规划具备极高借鉴价值。从聚落整体布局层面来看,传统古建筑群落普遍遵循“因地制宜、分区分隔、引水设防”的规划原则,依托自然地理条件构建双重防火屏障,外部依托河流、山体、林地形成天然防火隔离带,内部通过街巷、广场、水系、封火山墙实现人工防火分区,双向结合构建闭环式被动防火体系。

以江南水乡古建筑群落、皖南徽派民居集群为典型代表,此类高密度木质聚落普遍将内部水系网络与街巷路网相结合,街巷不仅承担交通通行功能,同时作为竖向防火分隔带,限制连片火灾横向蔓延;密布的河道、水塘既能够满足居民日常用水需求,也可作为应急消防水源,解决传统建筑无集中消防供水的痛点。相较于现代标准化住宅小区规整式路网布局,传统聚落宽窄交替、曲直结合的街巷布局模式,能够有效削弱火灾工况下空气对流强度,抑制火势借助风力快速扩散,同时狭窄街巷可降低人员日常用火风险,从行为层面减少火灾诱因。大型皇家园林、宗教古建筑集群创新性采用集群分区模式,将大规模建筑群拆解为若干独立小型组团,组团之间以绿化空地、防火墙、景观水系进行硬性分隔,组团内部独立营造、组团之间相互隔离,即便单一组团发生火情,也可实现火情局部可控,规避全域连片焚毁问题。该规划思维打破现代消防设计过度依赖主动灭火设备的固有思维,强调空间布局的防灾优先属性,契合当下低碳消防、被动防火的行业发展趋势。

（二）单体建筑适配性被动防火构造技术

在单体建筑营造层面,传统匠人针对木构建筑易燃短板,研发出涵盖墙体构造、屋面构造、门窗节点、梁柱防护的全套被动防火构造技术,所有构造设计均无需依托电力、机械设备,纯粹依靠材料属性与结构形式实现防火阻燃,具备低碳环保、造价低廉、适配老旧建筑改造、风貌兼容性强等多重优势,能够完美弥补现代老旧建筑更新中主动消防设备破坏建筑风貌的行业痛点。结合本研究案例拆解结果,当前具备直接复用价值的传统防火构造可划分为阻燃防护构造与防火分隔构造两大类。阻燃防护构造主要针对木质梁柱、屋架、楼板等核心承重构件,通过表层材料处理提升构件耐火极限。古代匠人普遍采用石灰、黏土、草木灰、蚌壳灰等纯天然无机材料,按照固定配比调制防火涂层,均匀涂刷于木质构件表层;该类无机涂层具备隔绝氧气、耐高温、不易燃烧的特性,既能够延缓木质构件起火速度,保护结构主体,同时可以防虫防腐,延长木构建筑使用寿命。

相较于现代化学防火涂料，纯天然无机防火材料无有毒有害物质、适配历史建筑风貌保护、改造成本低廉，尤其适配乡村自建民居、历史街区老旧木构建筑的防火升级改造。与此同时，部分北方民居采用砖石包裹木质梁柱的构造形式，以硬质耐火砖石作为外层防护，形成复合型承重防火构件，兼顾结构稳定性与防火安全性。防火分隔构造以封火山墙、防火门窗、隔断墙体为核心代表，其中封火山墙是我国传统建筑最具代表性的专项防火构造。封火山墙采用砖石、夯土等不燃材料砌筑，高度超越屋面屋脊，能够彻底阻断火势沿屋面木构架横向蔓延，同时兼具防风、装饰、界定产权的附加功能。徽派马头墙、闽派马鞍墙、粤派五岳墙等不同地域形制的防火墙，可适配南北差异化建筑风貌，在现代乡村民居、仿古商业建筑、历史街区更新项目中，可直接复刻应用，替代传统消防防火墙，平衡消防安全与地域文化风貌。

（三）适配现代场景的传统防火智慧转化路径

传统营造防火智慧诞生于农耕时代，适配木质结构、低层高、低密度的传统建筑形态，无法直接全盘套用至现代化高层钢筋混凝土建筑、超高层综合体项目。想要最大化发挥传统防火智慧的应用价值，必须摒弃机械式复刻思维，基于现代城乡建筑差异化场景，完成理念拆解、构造简化、材料升级、模式适配，实现传统智慧现代化转译，构建古今融合的复合型被动防火体系。面向城市存量更新场景，重点转化传统空间规划与风貌兼容型防火构造。城市历史文化街区、老旧城中村普遍存在消防通道狭窄、消防水源不足、增设主动设备破坏风貌等痛点，可借鉴传统聚落街巷分隔、水系设防思维，优化街区内部街巷布局，利用闲置空地打造微型防火隔离广场；复刻改良版封火山墙、无机防火涂层，替换老旧易燃外立面材料，在不破坏历史建筑原始风貌的前提下，提升存量建筑耐火等级，破解历史建筑消防改造两难困境。面向城市新建低层仿古商业街区项目，可全盘吸纳传统组团分区营造理念，结合现代防火规范要求，优化组团分隔距离，融合传统防火构造与现代主动喷淋系统，打造被动优先、主动兜底的复合型消防体系。面向乡村建设场景，简化传统复杂构造、优化材料配比，打造低成本轻量化防火方案。乡村自建民居建设预算有限、施工技术门槛较低，无需采用复杂高阶营造工艺，可推广低成本无机防火涂层、简易砖石防火隔墙、院落水系防火布局等轻量化策略；同时借鉴传统民居用火分区理念，将厨房明火区域与居住区域硬性分隔，从源头降低乡村民居火灾事故发生率。传统防火智慧的现代化转译，能够有效补

齐现代消防设计过度依赖主动设备、碳排放偏高、风貌适配性差的短板，丰富当代建筑防火设计的技术路径。

二、BIM 技术赋能建筑防火设计范式转型内在逻辑

在智慧建造行业大背景下，以 BIM、GIS、大数据仿真为核心的数字化技术，正在重构建筑消防设计全流程作业模式。本研究通过对比分析传统二维条文式消防设计与 BIM 数字化性能化消防设计的作业流程、评价标准、管控逻辑，明确技术赋能并非单一软件工具的浅层替换，而是涵盖设计思维、评价体系、作业流程、交付成果、审查机制的全方位范式变革，其本质是以数据化、可视化、动态化的性能化设计，替代经验化、静态化、单一化的传统条文式设计，适配复杂化、多元化的现代建筑业态。

（一）传统条文式消防设计的底层局限性

长久以来，国内建筑消防设计以指令性条文规范为唯一评判依据，形成了标准化、同质化的条文式设计范式，该范式依托二维图纸完成设计与报审工作，所有防火布局、设备选型、空间规划均对照固定规范红线执行，具备门槛低、易普及、审查便捷的优势，适配过去粗放式、标准化的增量建设阶段。但随着我国建筑业由增量开发转向存量更新，建筑业态日趋复杂，传统条文式设计范式的底层局限性被全方位放大，无法适配新时代智慧建造与高品质消防风控的发展需求。从设计思维层面分析，条文式设计属于静态底线型设计模式，仅规定建筑防火设计的最低合规标准，要求所有设计参数满足规范硬性阈值即可，并未考量建筑实际火灾工况下的动态安全余量。该思维引导设计师以“达标即可”作为设计目标，缺乏主动优化消防安全性能的主观意识，设计成果同质化严重，无法结合建筑业态、人流荷载、空间特征进行差异化优化。对于异形建筑、超大跨度中庭建筑、地下复合型空间等超规范业态，现行指令性条文无明确参考依据，静态化条文约束无法覆盖复杂工况，极易出现规范空白、设计无据可依的问题。从作业流程层面分析，二维条文式设计延续串行化后置校核模式，消防安全设计依附于建筑方案创作，整体存在重造型、轻安全、重后期、轻前期的结构性弊端。前期方案阶段不考量防火约束，后期仅能通过微调设备点位、压缩使用空间完成合规整改，无法从根源优化建筑防火体系。同时二维图纸信息碎片化，防火分区、疏散动线、消防管网分散于多张图纸之中，设计师与审查人员无法直观研判整体防火体系的协

同性，隐性消防隐患排查难度较大，返工率居高不下，造成行业普遍性资源内耗。

（二）BIM 数字化性能化设计的技术赋能机理

BIM 技术能够从信息载体、设计思维、校核逻辑、决策依据四个维度，破解传统条文式消防设计的固有短板，为消防设计范式转型提供底层技术支撑。相较于二维图纸单一平面信息载体，集成化 BIM 参数化模型可整合建筑空间信息、材料耐火参数、设备性能参数、人流荷载数据，实现消防设计信息一体化集成，为动态性能化仿真提供完整的数据底座，这也是数字化转型能够落地的核心基础条件。

在设计思维层面，BIM 技术推动消防设计由底线达标思维转变为动态优化思维。依托火灾烟气蔓延仿真、人员动态疏散模拟、耐火结构性能验算等数字化工具，设计师可预判不同设计方案在多元火灾工况下的安全性能，量化分析疏散时长、烟气浓度、结构损毁程度等核心指标，不再局限于静态规范条文，而是以实际火灾安全性能作为评价标准，针对复杂建筑业态制定差异化、定制化防火设计方案，填补超规范建筑的设计空白。

在作业与审查层面，BIM 协同平台打破专业时序壁垒，支撑建筑师与消防工程师并行协同作业，实现防火设计前置融入方案阶段，从源头规避先天性消防隐患；同时三维可视化模型能够直观展示防火分区边界、疏散路径、消防设备布局，自动筛查图纸错漏碰缺与合规性问题，降低设计返工率。对于审查端而言，数字化模型可直接对接智慧消防报审平台，实现自动化合规校验，简化审批流程、统一审查口径，解决传统二维图纸审查主观性强、效率低下的行业痛点。

（三）条文设计向性能化数字化设计的转型演进逻辑

消防设计范式的转型并非一蹴而就的颠覆性替换，而是遵循“辅助校核—并行设计—范式重构”三阶段渐进式演进逻辑，二者在很长一段时间内将处于互补共存状态，最终形成以条文规范为底线、性能化仿真为优化手段的复合型新型设计体系。第一阶段为 BIM 辅助校核阶段，该阶段以传统二维条文式设计为主体，BIM 模型仅作为辅助校核、可视化展示工具，用于辅助排查图纸隐患、优化消防布局，不改变原有作业流程与审查模式，是行业转型初期的主流形态。第二阶段为 BIM 并行协同阶段，适配行业数字化转型中期发展状态，设计单位全面推行三维建模为主、二维图纸为辅的作业模式，多专业依托云端协同平台同步开展设计，消防专业全程前置介入方案设计；性能化仿真工具广泛应用于复杂特殊建筑

项目，常规标准化项目仍沿用条文式设计，形成常规项目条文兜底、复杂项目性能优化的二元并行格局，也是现阶段国内建筑消防设计的主流发展形态。

第三阶段为全域性能化范式重构阶段，对应智慧建造成熟发展时期，行业统一完善 BIM 建模、仿真评判、交付验收全套标准，报审平台全面适配三维模型，彻底弱化二维图纸交付需求；所有建筑项目均可依托性能化仿真工具完成差异化防火设计，传统指令性条文仅作为基础底线约束，数字化性能化设计成为行业通用范式，最终完成消防设计行业全方位数字化升级。

三、城乡消防更新与数字化转型全域落地核心结论

立足于建筑学组织视角与城乡二元化发展格局，结合前文对行业技术阻力、市场化约束、团队协作文化、人才培养体系的全方位研究，综合城乡建筑业态、建设预算、用人水平、政策落地强度的差异化特征，可从城乡差异化改造策略、企业内部组织变革、全生命周期数据资产化三个维度，总结数字化消防设计全域落地的普适性结论，为不同层级市场、不同规模设计单位提供可落地、可复制的实施路径。

（一）城乡二元格局下建筑消防差异化更新结论

我国城市与乡村建筑在结构形式、建设成本、消防风险、运维能力层面存在显著鸿沟，统一化、标准化的消防设计方案无法适配全域市场需求，必须实行分类施策、差异化管理，分别制定城市端、乡村端专属消防更新与新建设计策略，实现安全效益、经济效益、风貌效益三者平衡统一。针对城市建筑市场，可细分为新建公建项目与存量更新项目两类主体，实行分层管控模式。城市新建高层、超高层、地下综合体等大型公建项目，资金充足、业态复杂、人员荷载庞大，需全面推行 BIM 一体化正向消防设计模式，以性能化仿真设计为核心，融合传统被动防火构造与现代主动消防设备，构建全周期复合型风控体系；同时强制要求交付标准化 BIM 消防模型，纳入项目全生命周期运维体系，实现设计、施工、运维三阶段数据贯通。城市老旧小区、历史街区等存量更新项目，以低成本改造、风貌保护为核心目标，摒弃大规模设备升级模式，借鉴传统被动防火营造智慧，优化空间布局与防火构造，搭配轻量化数字化隐患排查工具，精准定位高危隐患区域，开展靶向式微更新改造。

针对乡村建筑市场，考虑到乡村民居体量小、预算低、专业人才匮乏、运维

能力薄弱的基本特征，坚决杜绝照搬城市高阶 BIM 正向设计体系，推行轻量化、普惠化、易操作的低配版数字化消防模式。一方面编制标准化乡村民居 BIM 防火模板库，简化建模流程，降低乡村设计门槛；另一方面普及传统低成本被动防火构造，简化封火山墙、无机防火涂层等营造工艺，以被动防火为主、简易主动设备为辅，构建适配乡村经济水平的低成本防火体系，兼顾消防安全与乡村振兴背景下的风貌保护需求。

（二）数字化消防落地的设计单位组织变革结论

外部政策、市场、技术的转型红利，最终需要依托设计企业内部组织架构、协作文化、考核机制、人才体系的全方位变革，才能转化为实际落地成效。综合本研究第九章相关内容，设计单位数字化转型的最大阻力并非软件、硬件等技术短板，而是二维时代遗留的老旧组织模式、本位主义协作文化与滞后的人才培养体系，组织变革是破解行业转型困局的内部核心抓手。从流程与架构层面，所有大中型设计单位需逐步摒弃串行化事业部独立架构，搭建适配 BIM 并行协同模式的矩阵式组织架构，打破专业部门壁垒，建立跨专业协同设计小组，强制推行消防专业前置介入机制，将防火性能优化纳入方案设计顶层环节，从作业流程层面解决方案反复返工、专业对立内耗等问题。从绩效考核层面，重构复合型薪酬考评体系，弱化单一出图量考核权重，绑定建筑师与消防工程师绩效收益，以项目整体品质、报审通过率、协同质量为核心考核指标，从制度层面消解专业本位主义。从人才培养层面，企业内部需建立常态化交叉培训机制，高校端重构消防与 BIM 交叉融合课程体系，校企双向联动培育兼具空间设计思维、消防安全知识、数字化仿真能力的复合型人才；同时平衡转型容错与奖惩机制，给予数字化试点项目适度容错空间，降低管理层与项目负责人转型风险顾虑，自上而下培育一体化协同设计文化，全方位完善企业内部转型生态。

（三）BIM 消防模型全生命周期数据资产化发展结论

在智慧建造与数字经济双重赋能下，BIM 消防模型不再仅是单一阶段的设计交付成果，而是具备复用价值、经济价值、风控价值的数字化资产，推动消防设计数据资产化，是未来建筑消防行业高质量升级的核心发展方向，也是衔接设计、施工、运维三大阶段的关键纽带。现阶段行业普遍存在重设计、轻运维的认知误区，仅将 BIM 模型用于施工图设计与报审环节，项目交付后直接废弃，造成海量数字化资源浪费。从资产价值维度分析，BIM 消防数据资产可划分为技术

资产与风控资产两类。技术资产层面，项目积累的标准化防火构件族库、仿真参数库、优秀一体化设计案例，可在企业内部跨项目复用，大幅降低新项目建模与设计成本，形成企业专属数字化技术壁垒；风控资产层面，集成化 BIM 消防模型包含完整的防火布局、设备参数、疏散路径、隐患点位数据，施工阶段可指导消防管线精准布设，运维阶段可联动智慧消防平台，实现火情实时监测、隐患自动预警、应急疏散动态推演，提升建筑后期运维安全等级。

从行业发展层面，未来行业需统一全生命周期 BIM 消防数据交付标准，打通设计、施工、运维三阶段数据接口，杜绝数据断层；鼓励头部企业开放共享通用型防火构件库，搭建行业共享数据平台，降低中小设计单位数字化转型门槛。数据资产化能够最大化释放 BIM 技术附加价值，改变单一项目盈利模式，拓宽设计企业盈利赛道，引领消防设计行业由服务型行业向数字化资产型行业转型升级。

本研究系统提炼传统聚落规划、单体防火构造的可现代化复用成果，并明确古今防火智慧的适配转化路径；厘清 BIM 技术由辅助工具向核心载体进阶的底层逻辑，阐释条文式设计向性能化数字化设计渐进转型的三阶段演进规律；同时结合城乡二元化格局、企业组织管理逻辑、数字经济发展趋势，总结差异化更新策略、组织变革方案与数据资产化发展路径。三类核心结论相互补充、彼此赋能，完整揭示新时代建筑消防设计的发展痛点、转型机理与落地路径，为智慧建造背景下建筑消防设计行业的长效健康发展筑牢理论根基。

第二节 传统智慧与现代技术融合下的消防设计范式特征

智慧建造技术迭代升级与传统营造智慧现代化转译，共同推动建筑消防设计行业突破单一技术桎梏，催生古今融合、多维协同的全新消防设计范式。新范式打破现代消防过度依赖主动灭火设备、传统防火智慧适配性不足的双重短板，以低碳可持续发展为底层导向，整合被动防火构造、数字化仿真技术、性能化评价体系，重构全新作业流程与价值体系。结合前文研究成果，界定新型范式的核心价值目标、标准化工作流程与全域体系特征，能够明确行业未来发展形态，为后续技术研发、标准制定、人才培养提供统一参照基准。

一、古今融合消防设计范式的多层次核心价值目标

区别于传统消防设计仅聚焦安全合规的单一价值导向，传统营造智慧与 BIM 数字化技术融合后的新型消防设计范式，跳出单一防灾维度的思维局限，统筹文化风貌传承、结构长久安全、低碳绿色发展、经济成本可控四大维度，形成多层次、复合型价值目标体系，适配城市更新、乡村振兴、智慧建造等国家多重战略，兼顾建筑短期消防安全与长期综合发展效益。

（一）地域文化风貌活态传承价值

在存量更新与乡村振兴战略深度落地的时代背景下，建筑消防设计不再独立于文化保护之外，如何在保障消防安全的前提下，留存地域建筑风貌、延续传统营造文脉，成为新时代消防设计的重要价值命题。过往现代化消防改造普遍采用标准化、统一化的改造模式，大量增设外挂消防楼梯、喷淋管道、防火卷帘，虽然能够满足规范合规要求，但严重破坏历史建筑、乡村民居的原始外立面风貌与空间肌理，造成地域建筑文化同质化消亡，形成安全与文化二元对立的行业痛点。

古今融合的新型设计范式从根源上化解二者矛盾，将地域文化风貌活态传承纳入顶层价值目标。范式依托传统被动防火构造替代外挂式主动消防设备，以封火山墙、无机防火涂层、组团分隔布局等本土化营造手法，完成防火升级；此类构造诞生于本土营造体系，与传统建筑风貌高度适配，无需破坏建筑外立面与内部空间结构，实现防火改造无痕化。同时，BIM 数字化仿真工具可精准模拟不同构造方案的风貌适配度与防火性能，筛选兼顾文化遗产与安全防护的最优方案，在老旧街区更新、乡村民居建设、仿古商业建筑开发项目中，实现消防安全与文化遗产双向赋能。该价值目标彻底扭转现代化消防改造一刀切的粗放模式，将消防设计由单纯的安全配套工作，升级为建筑文化活态传承的重要载体，推动地域传统营造技艺、特色建筑形制的长效传承，契合我国文化强国建设的战略发展需求。

（二）全周期建筑结构安全保障价值

建筑结构安全是消防设计的底线目标，新型融合范式重构建筑全周期安全管控逻辑，将被动防火构造、BIM 动态仿真、性能化评价贯穿建筑设计、施工、运营、改造、拆除全生命周期，突破传统消防设计仅关注火情应急处置的局限性，兼顾火灾工况下短期结构防护与长期耐久性能提升，全方位升级建筑结构安全保

障等级。

在新建与改造设计阶段，依托 BIM 火灾仿真与结构性能耦合模拟技术，可测算火灾高温环境对钢筋混凝土、木质构件的损伤阈值，结合传统阻燃防护构造，针对性优化承重构件防火方案，规避高温灼烧引发的结构坍塌事故；在施工阶段，依托一体化 BIM 模型统筹消防设施与结构构件布局，排查管线碰撞、构件违规删减等隐患，保障结构完整性；在长期运维阶段，利用数字化数据资产实时监测防火构件老化程度、消防设备运行状态，定期更新结构耐火性能数据，提前预判结构安全风险，制定周期性维护与更新方案。

相较于传统范式仅聚焦火灾发生后的灭火疏散工作，新型融合范式实现由事后处置向事前预防、全周期管控转型升级，既能够抵御突发性火灾灾害，也可延缓防火构件、主体结构老化速度，延长建筑整体使用寿命，降低建筑全生命周期安全风险与维护成本，为各类建筑提供稳定长效的结构安全保障。

（三）绿色低碳可持续发展价值

双碳战略背景下，降低建筑业碳排放、推行绿色低碳建造模式，已成为行业高质量发展的硬性要求。传统现代化消防模式存在两大碳排放痛点：一是大量使用高能耗化学防火材料、主动电气消防设备，生产与运维阶段碳排放居高不下；二是频繁的图纸返工、粗放式建材采购，造成资源浪费与无效碳排放。古今融合的新型消防范式，以低碳可持续为核心导向，从材料、设计、运维三个层面降低消防板块碳排放，构建绿色低碳防火体系。材料层面，大规模推广石灰基、黏土基纯天然无机被动防火材料，替代高污染化学防火涂料与复合型阻燃板材。纯天然无机材料生产工艺简单、碳排放低、可回收循环利用，且报废后不会产生有毒有害污染物，契合绿色建造发展理念；设计层面，依托 BIM 性能化多方案比选功能，优化防火分区布局、精简冗余消防设备与建材用量，精准统计材料需求量，杜绝粗放采购造成的资源浪费，同时降低项目设计阶段返工率，减少无效工时碳排放；运维层面，被动防火构造无需依托电力能源即可实现防火阻燃，能够大幅降低建筑长期运维阶段电力消耗，缩减电气消防设备能耗碳排放。低碳可持续价值目标的落地，能够补齐现代消防模式高碳排放短板，推动建筑消防板块适配双碳战略，实现消防安全、文化传承与绿色低碳协同发展，完善绿色智慧建造体系的核心组成部分。

二、三位一体的新型消防设计标准化作业流程

基于上述多层次价值目标，本研究整合 BIM 数字化仿真技术、本土化传统被动防火构造、全域性能化评价体系三大核心要素，打破传统串行后置校核流程，搭建“BIM 仿真模拟 + 传统防火构造植入 + 性能化综合评价”三位一体的并行化新型作业流程。该流程覆盖概念规划、方案深化、施工图设计、方案终审四大阶段，明确各阶段技术应用重点与实施规范，形成标准化、可落地、可复制的一体化作业模式，适配城乡各类建筑项目。

设计阶段	BIM 仿真模拟模块工作内容	传统防火构造植入模块工作内容	性能化评价模块评判指标	适配项目类型
概念规划	搭建简易场地 BIM 模型，完成室外火灾蔓延、消防车通达性仿真，筛选最优整体布局方案；划定初步防火组团边界	借鉴传统聚落组团分隔、水系设防、街巷防火规划理念，完成宏观空间防火布局设计	防火间距合规性、天然隔离带覆盖率、场地疏散可达性、风貌适配基础等级	乡村聚居点、老旧街区、大型公建集群
方案深化	精细化建筑主体建模，开展多工况烟气蔓延、人员动态疏散仿真；对比多套平面方案安全性能数据	植入适配形制的封火山墙、无机防火涂层、防火隔断等被动构造，优化内部空间防火分隔模式	人员安全疏散时长、烟气临界高度、构件耐火极限、空间利用率、风貌匹配度	仿古商业建筑、乡村民居、高层公共建筑
施工图	完成消防机电一体化建模，开展管线碰撞校核、设备参数仿真校验；输出标准化报审 BIM 模型	细化被动防火构造施工节点图纸，明确材料配比、砌筑工艺、安装位置，衔接主动消防设备点位	主动被动系统适配度、构件建模精度、施工落地可行性、工程造价管控阈值	城市新建综合体、存量更新改造项目
方案终审	复盘全阶段仿真数据，优化高危区域消防布局，输出完整仿真分析报告	微调被动构造细节，平衡施工难度、风貌效果与防火性能，形成最终构造实施方案	综合安全评分、低碳碳排放指数、文化风貌评分、全周期性价比	全域所有类型城乡建筑项目

（一）BIM 数字化仿真模拟核心实施环节

BIM 数字化仿真模拟是新型作业流程的技术载体，贯穿设计全阶段，承担方案比选、隐患排查、数据支撑、成果交付四大核心职能。在概念规划阶段，设计人员依托轻量化场地 BIM 模型，模拟不同楼栋排布、街巷布局模式下的外部火灾蔓延规律、消防救援车辆通行效率，从宏观层面规避群体性火灾风险，为聚

落级防火规划提供量化数据支撑；该阶段仿真以宏观场地数据为主，无需精细化单体建模，降低前期设计工时成本。

在方案深化阶段，BIM 仿真模块为性能化评价提供核心量化数据，也是三位一体流程的核心枢纽。设计师结合建筑业态设定多元化火灾工况，分别测算起火后不同时间节点的烟气扩散范围、有毒气体浓度、结构构件温度变化、人员疏散剩余时间，精准定位平面布局中的高危疏散死角、防火薄弱区域；同时同步生成多套优化方案，量化对比各方案安全性能，为方案迭代优化提供客观依据，彻底摒弃主观经验化设计模式。

在施工图与终审阶段，仿真模块重点完成机电消防系统校核与方案复盘工作。一方面检测喷淋管网、排烟风机、报警设备与被动防火构造的适配性，排查管线与防火墙、防火分区的碰撞冲突；另一方面复盘全流程仿真数据，针对优化后仍存在安全短板的区域，微调设备参数与空间布局，最终输出配套 BIM 模型、仿真报告、参数明细表，同步满足报审、施工、运维三类交付需求。

（二）本土化被动防火构造分层植入环节

传统被动防火构造是新型作业流程的特色内核，按照宏观规划、中观布局、微观构造三个层级，分层植入对应设计阶段，实现传统智慧与现代建筑空间深度融合，兼顾风貌、低碳与安全三重价值。宏观层级对应概念规划阶段，植入传统聚落组团分隔、水系防火、街巷管控理念，主要应用于大型建筑集群、乡村聚居点、老旧街区项目，从整体层面构建天然防火隔离体系；中观层级对应方案深化阶段，以封火山墙、防火隔墙、分区隔断构造为核心，优化单体建筑内部防火分区与空间布局，适配绝大多数城乡民用建筑。

微观层级对应施工图设计阶段，聚焦构件表层防护与节点优化，主要推广纯天然无机防火涂层、阻燃型木质构件、防火门窗节点等精细化构造，重点应用于木构民居、历史保护建筑、仿古类建筑。在构造植入过程中，需遵循适配性转化原则，结合现代建筑层高、结构形式、规范要求，简化冗余传统工艺、优化材料配比，禁止机械式复刻复杂古建造，平衡施工难度、建设成本与防火性能。同时依托 BIM 模型记录被动构造完整参数，纳入模型资产库，方便后期施工落地与运维检修。被动构造分层植入能够有效降低现代主动消防设备的配置压力，减少电气设备碳排放与运维成本，形成被动防火为基础、主动设备为兜底、数字化仿真为优化手段的复合型防火体系，破解传统与现代设计模式的固有矛盾。

（三）多维度性能化综合评价终审环节

性能化综合评价作为三位一体流程的最终评判依据，承接 BIM 仿真数据与被动构造植入成果，跳出单一安全维度的评价局限，建立安全、风貌、低碳、成本四维一体的综合评分体系，替代传统单一规范条文审查模式，完成方案最终筛选与终审工作。评价体系采用百分制量化评分模式，四大维度权重根据项目类型动态调整，适配差异化项目需求。安全维度权重占比 40%，参考 BIM 仿真输出的疏散时长、烟气指标、构件耐火极限等数据，评判建筑整体防火风控能力，是所有项目的底线评分项；风貌维度权重占比 25%，重点评价被动防火构造与建筑外立面、内部空间的适配程度，历史建筑与乡村风貌类项目可适当上调权重；低碳维度权重占比 20%，结合建材碳排放系数、设备能耗数据，核算方案全周期碳排放总量，绿色低碳类项目优先参考该项指标；成本维度权重占比 15%，统计设计、施工、运维全周期综合造价，平衡安全投入与经济效益。

性能化综合评价环节能够解决传统审查模式主观性强、评价维度单一的问题，统一古今融合范式的终审标准，为设计人员方案优化、审查人员项目审批提供直观、量化的评判依据，推动新型作业流程标准化、规范化普及。

三、古今融合数字化防火设计体系核心特征

结合价值目标与标准化作业流程，可概括出新型消防设计范式的整体体系特征，该体系区别于传统单一化、碎片化、经验化的消防设计模式，以古今技术融合为内核，以数字化 BIM 平台为载体，形成全专业协同共创、全生命周期动态管控、城乡场景分类施策的复合型数字化防火设计体系，全方位适配智慧建造时代建筑消防行业的未来发展趋势。

（一）全专业扁平化协同共创特征

新型数字化防火设计体系彻底打破传统事业部垂直条块分割架构，构建扁平化跨专业协同组织模式，具备全专业同步介入、权责均衡、目标统一的核心特征。在该体系下，建筑师、消防工程师、结构工程师、低碳专项设计师、风貌设计师同步参与项目设计，不再存在主次从属关系，各专业基于同一 BIM 基准模型并行作业，分别从空间造型、消防安全、结构稳定、低碳环保、风貌传承维度提出优化意见，实现多专业共创共生。

相较于传统串行模式建筑师单一主导、消防专业后置校核的弊端，扁平化协

同模式赋予消防、风貌、低碳配套专业平等决策权限，针对涉及消防安全、历史风貌、碳排放红线的设计节点，配套专业具备一票否决权，从组织层面保障多维价值目标落地。同时依托一体化绩效考核机制，绑定所有参与人员绩效收益，弱化专业本位主义，引导全员以项目综合评分最优为统一目标，消解专业对立矛盾，重塑互利共赢的现代化协作文化。全专业扁平化协同特征，既是新型设计范式落地的组织基础，也是智慧建造背景下建筑设计行业组织变革的必然趋势，能够有效降低跨专业内耗、提升一体化设计效率，适配复杂业态项目的高阶设计需求。

（二）全生命周期动态化管控特征

传统消防设计体系仅覆盖方案设计与施工图交付两个阶段，与施工、运维、更新阶段相互割裂，数据断层问题突出；新型融合范式依托 BIM 数据资产化优势，打通设计、施工、运营、改造、报废五大阶段的数据接口，实现消防风控全生命周期动态化、闭环式管控，改变行业阶段性碎片化管控的固有格局。

设计阶段输出集成化 BIM 消防模型，包含被动构造参数、主动设备信息、仿真安全数据、碳排放数据等全套底层信息；施工阶段施工单位直接复用设计模型，指导被动防火构造砌筑、消防设备精准安装，同步更新施工变更数据；运营阶段联动智慧消防平台，实时监测设备运行状态、构件老化程度，动态更新火灾仿真数据，预判不同使用周期下的消防隐患；改造阶段可直接调取原始模型，结合当下规范与风貌要求，制定低成本更新方案，无需从零开始重新建模。

全周期动态管控能够实现数据反向迭代，项目全周期积累的风控数据、改造数据、事故隐患数据，可反向补充至行业参数库，优化 BIM 仿真参数阈值、完善被动构造设计标准，推动行业整体设计水平持续升级，形成数据闭环发展生态。

（三）城乡二元化分类施策适配特征

古今融合数字化防火设计体系摒弃一刀切的标准化推广模式，结合城市与乡村建筑的差异化特征，制定分层适配、梯度推广的落地策略，兼顾高阶大型项目与轻量化小型项目的多元化需求，具备极强的全域适配性，也是该体系能够覆盖我国城乡二元建筑市场的核心关键。

面向城市增量与存量市场，推行高阶完整版三位一体设计流程，全面应用精细化 BIM 仿真、多元化被动防火构造、四维综合评价体系，重点适配超高层综合体、地下空间、历史街区等高难度、高造价项目，追求安全、风貌、低碳、效益全方位最优；面向乡村振兴市场，推行轻量化精简版作业流程，简化复杂仿真

模块与高阶建模要求，普及低成本被动防火构造与简易 BIM 防火模板，弱化冗余评价指标，仅保留安全与成本两大核心评判维度，适配乡村低预算、低门槛、易施工的基本建设特征。

城乡二元分类施策特征，解决了高阶数字化技术下沉困难、传统防火智慧适配面狭窄的行业痛点，让新型消防设计范式既能够满足一线城市智慧建造高阶需求，也能够适配下沉市场乡村建设的基础防火需求，最大化拓宽范式应用边界，助力城乡建筑消防一体化均衡发展。

传统营造智慧与 BIM 数字化技术融合催生的全新消防设计范式，以风貌传承、结构安全、低碳可持续为多层次价值内核，依托三位一体标准化作业流程平衡多维度设计目标；凭借全专业扁平化协同、全周期动态管控、城乡分类施策三大核心特征，重构适配智慧建造与乡村振兴双战略的现代化防火设计体系。新范式有效化解安全与文化、低碳与成本、城市与乡村之间的发展矛盾，突破传统消防设计模式的发展瓶颈，为未来建筑消防行业高质量、可持续、全域化转型升级提供全新发展方向与标准化实施框架。

第三节 乡村振兴与城市更新中的消防策略展望

在存量更新常态化与乡村振兴纵深推进的双重时代背景下，我国城乡人居消防安全治理格局发生根本性转变，城市端聚焦历史街区、老旧建筑群的风貌保护性防火更新，乡村端侧重低成本、易落地、适配乡土肌理的基础防火建设，传统同质化、重设备轻空间的消防改造模式已无法适配两类场景的差异化诉求。结合本研究前文古今融合消防设计范式、被动营造智慧、数字化仿真技术的相关研究成果，从乡村轻量化防火体系发展、城市历史街区 CIM 全域韧性管控、城乡一体化分级消防技术研发三大层面，预判行业未来发展走向，拆解落地实施路径，为下一阶段城乡建筑消防高质量治理提供前瞻性规划与技术支撑。

一、乡村振兴视域下轻量化数字化防火体系发展预判

乡村建筑区别于城市现代化高层建筑，整体呈现民居布局分散、结构以砖木混合为主、建设资金有限、专业技术人才匮乏、后期运维体系缺失等典型特征，高阶全维度 BIM 正向设计、大型性能化仿真系统等城市级数字化消防技术，无

法直接下沉适配乡村建设场景。未来乡村建筑防火体系的发展核心，不在于技术高端化，而在于适配化、轻量化、普惠化，依托简化版 BIM 模拟工具、改良乡土阻燃构造，搭建低成本数字化 + 被动防火的复合型防控体系，逐步实现乡土防火技术的标准化、规模化普及应用。

（一）轻量化 BIM 防火模拟工具的下沉与迭代升级

长期以来，数字化消防技术下沉乡村市场存在两大核心壁垒，其一为传统 BIM 软件操作门槛高，需要从业人员具备专业建模、仿真参数调试能力，乡村基层设计人员、村镇施工团队难以掌握；其二为高阶仿真软件设备配置要求高、授权成本昂贵，中小型乡村建设项目无力承担长期使用成本，这也是现阶段乡村消防数字化建设进度滞后的主要原因。立足于乡村建设的底层需求，未来轻量化、模块化、模板化的专用 BIM 防火模拟工具，将成为乡村消防数字化转型的核心突破口，完成从复杂专业软件向简易实用工具的形态转变。从产品迭代方向来看，适配乡村场景的轻量化 BIM 防火模拟工具，将剥离高阶软件中复杂的机电建模、多工况耦合仿真、精细化数据演算等冗余功能，聚焦乡村民居高频需求，固化民居基础模型库与火灾仿真参数库。相关技术研发机构可整合南北不同地域乡村民居形制，涵盖独栋民居、联排民居、院落式民居、乡村公共配套建筑等主流业态，提前完成标准化建模工作，内置适配砖木、砖混、简易钢结构等乡村主流结构的材料耐火参数、人流荷载参数、火源模拟参数。基层设计人员无需从零开始建模，仅需调取对应户型模板，结合项目实际尺寸微调模型参数，即可一键完成火灾蔓延、人员疏散两项基础仿真作业，极大降低数字化技术使用门槛。从应用场景拓展层面分析，轻量化 BIM 模拟工具将覆盖乡村新建民居设计、老旧民居防火改造、乡村聚居点整体消防规划三大场景。新建民居阶段，设计人员依托工具比对不同开窗形式、厨房布局、隔墙位置的防火性能，规避先天性火灾隐患；老旧民居改造阶段，借助简易仿真功能定位建筑易燃薄弱区域，针对性布设被动防火构造；聚落规划阶段，依托场地轻量化模型，模拟村落街巷、水塘、绿化布局对火情的抑制作用，优化村落整体防火格局。同时，后续工具将逐步适配移动端操作模式，摆脱电脑设备束缚，适配乡村户外踏勘、现场设计的工作模式，进一步拓宽技术普及范围。

（二）乡土适配型阻燃构造的规模化落地应用

传统乡土防火构造承载着古代匠人适配本土气候、材料资源、建造工艺的防

灾智慧，具备造价低廉、风貌适配性强、施工门槛低、低碳环保等先天优势，是乡村防火体系的核心根基。结合乡村振兴风貌保护与低碳建设要求，未来乡土阻燃构造不再是零散化、碎片化的单点应用，而是完成材料改良、工艺简化、标准制定、分区适配的全方位升级，实现南北地域差异化阻燃构造的规模化、产业化落地，构建本土化被动防火技术矩阵，补齐乡村主动消防设备配置不足的短板。

材料改良层面，科研团队将以传统石灰、黏土、草木灰复合无机防火涂层为基础，进行现代化配比优化，在保留零污染、低成本、风貌兼容优势的前提下，提升材料附着能力与耐火极限。针对南方潮湿多雨、木构易腐朽的地域特征，研发防潮阻燃一体化复合涂层；针对北方干燥多风、火情扩散速度快的特点，调配高密闭性防火封堵材料，适配南北乡村差异化气候环境。同时摒弃传统复杂的古法炼制工艺，实现防火涂层预制化量产，以桶装成品材料直接面向乡村市场，村民仅需简单涂刷即可完成施工，无需专业匠人参与，大幅降低工艺门槛。地域适配层面，依托我国传统民居防火营造经验，划分区域推广专属被动防火构造。皖南、江浙、闽粤等南方水乡木构富集区域，规模化推广轻量化改良版马头墙、马鞍墙、水系隔离布局，延续江南民居特色风貌的同时，阻断连片火情蔓延；华北、西北北方民居片区，重点普及砖石包裹梁柱、夯土防火隔墙、院落分区隔离等构造形式，适配北方合院式民居形制；西南少数民族聚居区域，结合吊脚楼、干栏式建筑结构特征，简化传统防火隔断工艺，打造适配山地民居的低成本阻燃体系。与此同时，行业将出台乡土防火构造专项设计图集，明确不同户型、不同层高对应的构造尺寸、施工规范，为规模化落地提供标准支撑。

（三）被动与主动协同的乡村复合型防火模式完善

单一被动防火构造无法完全抵御极端火情，简易主动消防设备仍是乡村防火的兜底保障，未来乡村防火体系将形成“被动防火为主、主动设备兜底、数字化模拟优化”的复合型发展模式，平衡消防安全、风貌保护与建设成本三者关系，破解乡村防火改造两难困境。该模式摒弃城市建筑高配置、全覆盖的设备布设思维，遵循低成本精准布设原则，结合轻量化 BIM 模拟的隐患研判结果，仅在高危区域配置简易主动消防设施，适配乡村经济发展水平。在民居单体层面，以乡土阻燃构造完成基础防护，通过防火涂层、分户隔墙、明火分区隔离等手段，从源头降低起火概率、延缓火势蔓延；仅在厨房、储物间等高风险区域，配备简易干粉灭火器、壁挂式简易喷淋、独立烟感报警器等低成本设备，无需布设复杂消

防管网，控制改造成本。在村落聚落层面，依托传统水系、街巷、绿化构建天然防火隔离带，整合村落闲置空地打造微型应急避难场地与消防取水点；同时联动村级网格化管理体系，结合轻量化数字化隐患台账，定期排查老旧线路、易燃易爆杂物堆放等人为隐患，形成技术防控+人为管控的双重保障机制。

复合型防火模式将同步配套乡村防火科普体系，依托村委会、乡村建设工作站，向村民普及乡土防火构造维护技巧、简易消防设备使用方法、日常用火用电规范，扭转乡村居民重居住、轻安防的固有认知。技术升级与意识培育双向并行，能够从硬件、软件两个维度全方位提升乡村民居防火等级，筑牢乡村人居消防安全底线。

轻量化 BIM 仿真工具的普惠下沉、乡土阻燃构造的标准化量产、主被动复合型防火模式的全域普及，共同构成未来乡村建筑防火的核心发展脉络。该发展路径跳出城市技术照搬的误区，深度贴合乡村建设的经济条件、技术水平与风貌特征，能够系统性解决乡村火灾高发、改造资金不足、专业人才短缺等行业痛点，为乡村振兴战略背景下人居环境提质、乡土文化活态传承提供坚实的消防安全保障。

二、城市更新下历史街区 CIM 全域防火韧性数字化管控

城市历史街区作为承载地域文化记忆、兼具社会价值与历史价值的特殊存量空间，具备建筑密度高、街巷狭窄、老旧易燃构件多、消防救援难度大、风貌管控严格等特征，常规消防改造极易破坏街区原始空间肌理。相较于 BIM 技术聚焦单体建筑的管控模式，CIM 城市信息模型可整合片区地形、建筑、管网、交通、人文等多维数据，适配街区全域统筹管控需求。未来城市历史街区防火更新将以 CIM 平台为核心载体，搭建全域韧性防火数字化管控体系，实现风貌保护与消防安全双向统一，助力城市存量空间高质量更新。

（一）历史街区 CIM 防火数据库搭建与资源整合

数据库是 CIM 数字化防火管控体系的底层基础，区别于普通城区标准化数据库，历史街区 CIM 防火数据库需要兼顾消防安全管控、历史风貌存档、建筑遗产保护多重目标，整合空间地理数据、建筑本体数据、消防设施数据、历史风貌数据、应急资源数据五大类核心信息，打破过往消防、住建、文旅多部门数据割裂的局面，构建一体化全域数据资源池，为后续风险研判、方案优化、应急调

度提供完整数据支撑。

（一）多源异构基础数据的采集与入库

历史街区建筑年代久远、产权复杂、原始施工图纸缺失问题普遍存在，数据采集工作是数据库搭建的首要难点。在空间地理数据层面，依托无人机倾斜摄影、三维激光扫描技术，快速复刻历史街区全域三维实景模型，精准记录街巷宽度、建筑间距、地形高差、水系分布等宏观空间信息，还原街区原始空间肌理；在建筑本体数据层面，对街区内所有建筑进行分户建档，录入建筑结构形式、建造年代、外立面形制、易燃构件分布、被动防火构造现状等基础信息，同步采集材料耐火极限、起火风险等级等消防专项数据，区分文保建筑、历史风貌建筑、普通老旧建筑三类层级，实行分类建档管理。

在配套设施数据层面，整合市政消防管网、消火栓、应急取水点、电气线路、燃气管道等地下隐蔽工程数据，补齐传统二维图纸无法覆盖的地下空间信息；在应急资源数据层面，录入消防救援站点位置、微型消防站物资储备、救援车辆通行阈值、应急避难场地容量等数据；在风貌数据层面，收录建筑原始外立面照片、传统营造构件参数、非遗营造技艺资料，划定风貌红线管控范围，明确消防改造禁止触碰的保护区域，从数据层面规避风貌破坏风险。各类数据完成采集后，按照统一数据格式完成脱敏、分类、入库处理，实现多源异构数据融合互通。

（二）数据库动态更新与跨部门共享机制

静态固化的数据无法适配历史街区长期更新管控需求，常态化动态更新机制是保障 CIM 平台管控有效性的关键。未来行业将建立“月度排查、季度更新、年度复盘”的数据更新制度，由街道办事处联合消防救援大队、文旅部门、设计单位组建专项工作小组，定期排查街区内建筑改造、消防设施老化、植被更迭、管线更新等变动信息，同步更新 CIM 数据库对应板块内容。针对零散化居民自主改造行为，实行改造报备制度，所有涉及墙体拆改、易燃材料更换、明火区域调整的改造项目，均需报备录入平台，实现全域建筑动态可控。同时搭建跨部门数据共享接口，打通消防救援、住房城乡建设、文化旅游、城市管理、应急管理五大职能部门的数据壁垒。消防部门可调取建筑风险数据开展隐患排查与火情推演；文旅部门可依托风貌数据开展遗产保护工作；住建部门可结合管网、建筑数据统筹更新改造计划；应急部门可借助应急资源数据优化救援调度方案。统一的数据共享机制能够避免重复勘测、重复建档造成的资源浪费，提升历史街区消防

安全治理的协同效率，破解多头管理、权责分散的行业治理难题。

（三）风貌与安全双红线数据分级管控

为从根源化解消防改造与风貌保护的矛盾，CIM 防火数据库将增设双红线分级管控模块，以数据为基准划定安全管控红线与风貌保护红线，明确不同等级建筑的改造权限与技术适配方案。针对国家级、市级文物保护建筑，划定最高等级风貌红线，禁止增设外挂消防楼梯、外露喷淋管道等破坏外立面的设施，防火改造仅能依托传统被动防火构造与隐蔽式主动设备；针对普通历史风貌建筑，适度放宽管控权限，允许在非外立面区域布设简易消防设备；针对普通老旧民居，以消防安全为首要目标，灵活搭配主动、被动防火技术。

双红线管控模式将抽象的保护规范转化为具象化数据指标，为设计人员、施工单位、审批部门提供清晰的执行标准，杜绝一刀切式粗放改造与过度保守的消极保护两种极端现象。同时平台可自动预警违规改造行为，当改造方案触碰风貌红线或安全红线时，系统自动拦截并推送优化建议，实现历史街区消防改造全流程智能化监管。

二、基于 CIM 平台的全域防火韧性管控实施路径

完善的数据库为 CIM 防火管控提供基础支撑，结合历史街区风险防控、日常运维、应急救援三大核心场景，可搭建风险预判、方案优化、应急调度、长效运维四位一体的全域韧性管控体系。该体系贯穿历史街区更新改造与日常运营全周期，依托数字化仿真推演能力，实现火灾风险从事后处置向事前预防、全域统筹转型升级，全面提升老旧历史街区的火灾抵御能力与灾后恢复能力。

（一）全域火灾风险智能化研判与分级预警

依托 CIM 全域三维模型与内置火灾仿真引擎，平台可开展多维度、多工况火灾风险智能化研判，覆盖单点火情蔓延、连片火情扩散、烟气聚集风险、救援通行风险四大研判维度。相较于传统人工巡检模式，数字化仿真能够精准识别街巷死角、密闭院落、易燃构件集群等人工难以察觉的高危隐患区域，结合季节气候、用火习惯、建筑属性等变量，测算不同区域的起火概率与灾害等级，并按照高、中、低三个等级完成全域风险分区标注，直观展示街区防火薄弱板块。

在日常运维阶段，平台联动街区物联网监测设备，实时采集室内温度、烟雾浓度、电气线路负荷等数据，一旦监测数据超出安全阈值，立即向网格员、居民、

消防部门推送分级预警信息，实现隐患早发现、早处置；在规划设计阶段，设计人员可调取风险分区数据，针对性制定差异化更新方案，高风险区域优先完成易燃构件替换、被动防火构造植入、微型消防站点布设，中低风险区域以常态化隐患排查为主，合理分配改造资金，提升资金利用效率。

（二）风貌兼容型防火更新方案智能优化

CIM 平台内置古今融合三位一体设计评价体系，可自动比对多套防火更新方案的安全性能、风貌适配度、改造成本、碳排放指数，为历史街区筛选最优更新方案，解决传统方案设计主观性强、维度单一的问题。平台依托双红线管控数据，自动剔除触碰风貌保护红线的粗放改造方案，并结合建筑等级、街巷空间尺度，推荐适配的被动防火构造类型与主动设备布设位置，在保障消防安全的前提下，最大限度保留街区原始空间肌理与建筑风貌。

平台具备方案模拟推演功能，可直观展示改造前后建筑耐火性能、疏散效率、火情抵御能力的变化，同时可视化呈现被动防火构造、隐蔽式消防设备与建筑外立面的融合效果，方便设计人员与审批人员直观评估方案可行性。针对连片老旧民居集群更新项目，平台可统筹片区整体布局，优化组团防火分隔、应急疏散通道、消防取水点位，实现单体建筑防护与片区全域防控协同统一。

（三）突发性火情一体化应急调度管控

历史街区街巷狭窄、路网复杂、救援车辆通行受限，火情发生后极易出现救援路线混乱、疏散通道拥堵、应急资源调配滞后等问题。CIM 全域管控平台可依托三维路网模型、应急资源数据库，搭建智能化应急调度模块，火情触发后自动启动应急处置预案，完成人员疏散、物资调配、救援路线规划一体化统筹管控。人员疏散层面，系统结合起火位置、烟气扩散方向、人员分布密度，动态规划多条最优疏散路线，规避拥堵路段与高危区域，同步向周边居民推送疏散指引；资源调配层面，自动匹配距离起火点最近的微型消防站、消防取水点与应急物资，指导网格员快速调配物资；救援调度层面，区分大型消防车与小型救援设备通行阈值，为外部消防队伍规划专属通行路线，同时告知救援人员起火建筑结构弱点、易燃构件分布、隐蔽消防设施位置，降低救援难度，缩短救援处置时长，最大限度降低火灾灾害损失。

三、城乡一体化分级消防规划与低碳改造技术研发展望

城乡二元化建筑格局决定消防技术无法实现全域标准化统一，未来行业研发重心将聚焦一体化分级消防规划体系、低成本低碳数字化改造技术两大方向，打通城市高阶技术下沉通道、乡村基础技术上行反馈通道，缩小城乡消防安全治理差距，构建层级清晰、适配全域、低碳经济的现代化城乡消防治理新格局，适配智慧建造与双碳战略双重发展要求。

（一）多层次城乡一体化分级消防规划体系构建

城乡一体化分级消防规划以行政区划为基础，结合建筑业态、人口密度、经济水平、火灾风险，将城乡全域划分为都市核心区、城郊结合区、乡镇聚居区、偏远乡村区四个层级，制定差异化的规划标准、技术方案、管控模式，打破过往城乡消防规划割裂、标准断层的发展现状，实现消防资源自上而下合理分配。

都市核心区以全域性能化数字化管控为核心，全面普及 CIM+BIM 一体化管控模式，依托高性能仿真系统，完成超高层、历史街区、地下空间等复杂业态的精细化消防规划；城郊结合区兼顾新建建筑与老旧建筑，推行条文规范+性能优化二元模式，重点完善老旧小区基础消防配套；乡镇聚居区简化数字化管控流程，采用轻量化 BIM 工具开展集中连片民居消防规划，配套标准化被动防火构造；偏远乡村区以低成本被动防火为核心，仅布设基础应急消防水源与简易主动设备，降低规划落地成本。

同时建立层级联动应急机制，高等级区域火情可调动周边低等级区域应急资源，乡村偏远区域险情可联动乡镇微型消防站与城市专业救援队伍，形成全域联动、资源共享的一体化应急网络，补齐偏远乡村应急救援短板。

（二）存量建筑低成本数字化隐患排查技术研发

存量建筑数字化改造成本过高，是制约城乡老旧建筑防火提质的普遍性难题，未来技术研发机构需重点攻坚轻量化、低成本、易普及的隐患排查技术与设备，降低中小城市、乡镇、乡村存量项目数字化转型门槛。硬件层面，研发便携式一体化隐患巡检设备，集成烟雾探测、结构测温、线路检测功能，搭配移动端简易分析软件，基层工作人员可快速完成老旧建筑全方位隐患排查；软件层面，开发免费开源版轻量化 BIM 隐患分析小程序，取消软件授权收费模式，面向基层设计单位、村镇集体免费开放基础建模与仿真功能。依托大数据技术搭建全国存量建筑防火隐患共享数据库，汇总不同地域、不同结构建筑的高频火灾隐患、改造优

化方案，形成标准化案例库。基层团队可直接检索同类项目改造经验，无需重复开展仿真推演与方案设计，大幅缩短改造周期、节约设计成本。低成本数字化技术的普及，能够让数字化消防技术不再成为一线城市专属资源，实现全域普惠共享。

（三）低碳化城乡消防更新材料与工艺迭代

双碳战略背景下，低碳化将成为城乡消防更新技术的硬性研发方向，未来行业将聚焦传统无机阻燃材料升级、低碳消防设备研发、废旧建材循环利用三大板块，降低消防改造全生命周期碳排放。材料层面，扩大纯天然无机防火涂层、夯土防火隔墙、再生砖石防火构件的量产规模，替代高碳排放化学防火涂料；工艺层面，简化被动防火构造施工流程，推行预制化装配模式，减少施工现场建筑垃圾与能源消耗；设备层面，研发低能耗智能消防设备，优化设备休眠节能模式，降低长期运维阶段电力碳排放。

同时建立建材碳排放评级制度，将碳排放指标纳入性能化综合评价体系，同等安全与成本条件下，优先选用低碳乡土材料与再生建材，推动城乡消防更新改造向绿色化、低碳化方向转型升级，实现消防安全、风貌保护、低碳发展三位一体协同共进。

CIM 全域数据库与双红线管控机制能够破解历史街区风貌保护与消防改造的核心矛盾，四维一体韧性管控体系可全方位提升老旧城区火灾抵御与应急处置能力；而城乡分级消防规划、低成本低碳数字化改造技术，能够补齐城乡二元消防治理短板，平衡资源分配差距。多类技术与规划制度相辅相成，共同构成未来城乡存量建筑消防更新的核心发展框架，为我国城市更新与乡村振兴战略协同落地提供坚实的消防安全保障。

第四节 对建筑学教育、职业实践及乡村建设的启示

建筑消防设计作为建筑学学科交叉领域，融合空间营造、结构工程、数字化技术、防灾科学、乡土文化等多重知识体系，贯穿高校人才培养、设计院职业设计、城乡项目落地全链条。基于本研究古今融合消防设计范式、数字化转型机理、城乡差异化更新策略等研究成果，分别从高校建筑学专业教育改革、设计院职业化落地实践、乡村振兴项目建设三个维度，提炼针对性启示与实操建议，打通理论研究、人才培育、产业落地的闭环通道，完善新时代建筑学行业全方位发展生态。

一、对高校建筑学专业消防类课程体系改革的启示

现阶段国内多数高校建筑学专业消防相关课程存在知识体系陈旧、课程模块单一、理论与实践脱节、数字化内容缺失等问题,课程教学仍以传统条文规范背诵、二维图纸消防校核为主,未覆盖被动防火营造智慧、BIM 性能化仿真、城乡差异化设计等前沿内容,培养的学生无法适配智慧建造与乡村振兴背景下的行业用人需求。基于全新消防设计范式的发展要求,高校需重构“消防+BIM+乡土营造”三位一体融合课程体系,优化教学模块与实训模式,推动消防类课程从单一合规教学向复合型综合设计教学转型升级。

(一) 重构分层递进式融合课程模块

结合建筑学本科、研究生不同培养阶段的培养目标,搭建基础认知、专业深化、前沿拓展三层递进式课程模块,打破消防知识依附于建筑设计课程的碎片化现状,设立独立的消防专项课程与配套选修课程,完善学科知识架构。本科低年级阶段开设《建筑防灾基础》必修课程,作为基础认知模块,讲解建筑火灾发生机理、基础消防规范、传统乡土防火营造常识,夯实学生基础防灾认知,扭转学生重造型、轻安防的固有设计思维。本科高年级阶段增设《数字化消防设计》核心必修模块,聚焦 BIM 建模、火灾烟气仿真、人员动态疏散模拟、性能化评价等数字化内容,讲解条文式设计 with 性能化设计的差异化逻辑,配套基础软件实操教学,让学生掌握常规项目合规设计、复杂项目仿真优化的双重能力;同步开设《传统营造与被动防火》选修课程,拆解南北传统民居、古建群落的防火规划与构造技术,讲解传统智慧现代化转译方法,补齐乡土营造知识短板。

研究生阶段开设《城乡差异化消防更新》前沿拓展模块,面向存量更新、乡村更新两大赛道,深度剖析城市历史街区、老旧小区、乡村民居的防火改造痛点,讲授 CIM 全域管控、分级消防规划、低成本低碳改造等高阶理论,引导学生结合地域特征开展专项课题研究,培育具备科研创新能力的高端复合型人才,适配行业多元化用人需求。

(二) 优化理论教学与案例教学融合模式

过往消防课程普遍采用“规范讲解+图纸纠错”的单一教学模式,内容枯燥且脱离实际项目,学生仅能机械记忆规范红线,无法理解防火设计背后的底层逻辑,难以灵活应对异形建筑、老旧存量建筑、乡村民居等超规范场景。未来高校

需摒弃填鸭式规范教学模式，推行理论底层逻辑+全域典型案例双向融合教学法，深化学生对古今融合消防范式的理解与应用能力。理论教学层面，弱化强制性规范背诵内容，重点讲解火灾热力学、烟气扩散规律、人员疏散心理学、被动防火构造阻燃机理等底层原理，让学生从根源理解防火分区、疏散宽度、耐火等级等规范指标的制定依据，实现知其然更知其所以然；案例教学层面，建立多元化案例资源库，涵盖传统古建被动防火案例、城市新建公建 BIM 性能化设计案例、历史街区 CIM 更新案例、乡村轻量化防火改造案例四大类别，横向对比不同场景、不同技术方案的优劣性，纵向剖析传统营造智慧与现代数字化技术的融合路径。

同时引入反向案例教学模式，选取过往发生的典型建筑火灾事故、改造失败项目，复盘事故诱因、设计缺陷、改造误区，引导学生自主研判设计漏洞，提出优化方案，强化学生风险防控思维，将防灾意识内化至设计全过程。

（三）搭建校企联动立体化实训培养体系

实训环节是衔接校园理论知识与行业职业实践的核心桥梁，当前高校消防类实训多以虚拟题目设计、纸面图纸绘制为主，学生缺乏真实项目实操经验，入职后适配周期较长。针对该痛点，高校需联动设计院、乡村建设工作站、数字化科技企业，搭建线上仿真实训+线下项目实操的立体化实训体系，全方位提升学生实操能力，实现人才培养与行业需求无缝对接。线上实训层面，高校搭建校内数字化实训平台，配置轻量化 BIM 防火仿真软件、简易 CIM 模拟系统，发布城乡不同类型的虚拟实训题目，要求学生独立完成户型建模、工况仿真、被动构造植入、性能化评价全流程作业，熟练掌握数字化工具的基础操作；线下实训层面，建立校外实训基地，组织高年级学生深入合作设计院，参与真实项目的消防校核、方案优化工作，同时组织专项下乡实训活动，深入乡村聚居点、历史街区，实地调研乡土防火构造，参与乡村民居低成本防火改造微项目。

定期联合企业举办消防设计专项竞赛，以城乡真实更新项目为竞赛题目，鼓励学生自主设计古今融合型防火方案，企业资深设计师、高校导师双向联合评审，以赛促学、以赛促练，完善复合型人才培育闭环，为行业输送兼具造型设计、消防安全、数字化实操、乡土适配能力的高素质建筑学人才。

二、对设计院职业化 BIM 消防协同实践的启示

设计院作为建筑消防设计落地的核心主体，现阶段多数设计单位仍沿用二维

串行化作业模式，跨专业壁垒森严、绩效考核滞后、数字化人才短缺、协同流程混乱等问题普遍存在，严重制约 BIM 一体化消防设计模式的普及落地。结合前文组织变革相关研究结论，从协同流程重构、人才梯队配置、绩效考核优化三个层面，提出可直接落地的实操性建议，助力设计院完成数字化消防协同体系升级，降低转型成本、破解转型阻力。

（一）重构扁平化跨专业协同作业流程

传统事业部垂直架构下，建筑、消防、结构、机电专业独立作业、串行交付，消防专业始终处于后置从属地位，极易出现方案成型后防火布局不符合规范、空间与消防设施冲突等问题，返工成本居高不下。为适配 BIM 并行协同设计模式，设计院需逐步拆解传统垂直事业部架构，组建专项数字化协同设计小组，重构扁平化作业流程，打破专业部门壁垒，实现多专业同步共创。小组人员配置涵盖建筑主创设计师、专职消防工程师、结构设计师、机电设计师、数字化建模专员五类岗位，所有岗位基于同一云端 BIM 基准模型并行开展工作。在概念规划阶段，消防工程师提前介入，结合项目业态划定防火分区底线、疏散通道红线、被动防火构造布设范围，从源头规避先天性隐患；方案深化阶段，各专业实时同步更新模型数据，自动排查管线碰撞、空间冲突、合规性缺陷；施工图阶段，统一图纸交付标准，实现三维模型与施工图纸双向联动，修改一处同步更新全专业内容，彻底解决反复返工问题。

针对中小型项目，可简化小组架构，由具备 BIM 操作能力的建筑设计师兼任基础消防校核工作；针对大型复杂公建、历史街区更新项目，配置专职性能化仿真专员，负责多工况模拟与数据演算，形成分层适配的作业模式，兼顾作业效率与人力成本。

（二）搭建分层分类数字化人才配置梯队

复合型数字化人才储备不足，是阻碍中小型设计院数字化转型的核心瓶颈，盲目全员高薪招聘高阶 BIM 消防人才，会大幅增加企业人力成本，适配大型头部设计院，但不适用于中小规模设计单位。未来设计院需结合自身业务体量与项目类型，搭建管理层、骨干层、基础层三级分层人才梯队，差异化开展人才培育与岗位配置，平衡转型效果与人力投入成本。管理层以项目总监、部门负责人为培育对象，培训重心不在于软件操作，而在于数字化协同逻辑、新型绩效管理制度、BIM 项目成本管控模式，使其具备统筹数字化项目、平衡转型风险的能力，

为部门数字化转型提供决策支撑；骨干层吸纳资深建筑设计师、消防工程师，开展高阶 BIM 仿真、性能化评价、CIM 平台对接专项培训，作为项目核心技术支撑，负责复杂项目方案优化、仿真推演、技术难题攻坚；基础层面向新晋设计师、助理设计师，开展轻量化建模、基础合规校核培训，负责模型搭建、图纸深化、数据录入等基础工作。

同时建立内部人才轮岗交流机制，鼓励建筑设计师学习消防基础知识、消防工程师掌握基础建模技能，培育一专多能的复合型人才，弱化专业边界限制；推行内部师徒绑定制度，由骨干层人员带领基础层人员参与数字化项目，快速提升团队整体专业水平，稳步完成人才梯队升级。

（三）优化适配数字化模式绩效考核制度

绩效考核制度直接决定设计师的工作导向，传统以出图量、图纸数量为核心的考评体系，适配二维快速出图模式，与 BIM 精细化协同设计模式存在本质冲突，也是内部人员抵触数字化转型的核心制度诱因。设计院必须同步革新薪酬考评体系，弱化单一量化出图指标，增设协同质量、方案品质、数字化复用价值、隐患优化成效等多元化考评维度，建立适配新型作业模式的复合型绩效制度。在指标权重分配上，下调纯出图量化指标权重至 30%，剩余 70% 权重分配至四大新增维度：协同质量维度考核各专业配合效率、返工频次；方案品质维度考核防火方案安全等级、风貌适配度、低碳效益；数字化复用价值维度考核模型构件库、仿真案例库的沉淀数量；隐患优化维度考核项目前期隐患排查数量、高危风险整改成效。多维度指标相互制衡，引导设计师由追求出图速度，转向追求项目综合品质。除此之外，设立数字化转型专项奖励基金，对试点项目团队、优秀复合型人才给予额外现金奖励与晋升倾斜；同时设置适度容错机制，对数字化试点项目中非原则性技术失误免于追责，降低设计师转型顾虑，自上而下培育一体化协同设计文化，从制度层面扫清数字化转型内部阻力。

三、对乡村振兴背景下乡土建筑防火建设的启示

乡村建筑防火建设区别于城市商业化项目，不能照搬高端数字化设备、高标准主动消防配套，也不能单纯依赖传统被动防火构造故步自封，需要结合乡村经济预算、乡土风貌、施工水平、运维能力，打造低成本、易施工、风貌兼容、低运维的成套化防火实施思路。结合本研究城乡差异化更新结论，从前期规划设计、

中期施工落地、后期长效运维三个阶段，提出适配乡村振兴项目的全流程实施建议，助力乡村人居环境提质与乡土文化活态传承双向协同发展。

（一）前期规划：因地制宜制定分级防火设计方案

乡村聚落形态分散化、民居形制差异化特征显著，不同区位、不同用途的乡村建筑，火灾风险与改造需求存在较大差距，统一化设计方案无法适配全域乡村市场。在项目前期规划阶段，建设团队需完成全域踏勘分级，结合建筑用途、结构材质、所处区位、村民经济承受能力，划分核心风貌保护区、集中聚居提质区、偏远散户建设区三个层级，制定差异化的规划设计方案。核心风貌保护区以历史古建村落、特色民俗村落为主，该区域以风貌保护为第一优先级，全面禁用外露式主动消防设备，复刻改良版乡土被动防火构造，依托街巷分隔、水系设防、封火山墙、无机防火涂层等传统技术，搭建全域被动防火体系；同时调用轻量化 BIM 工具，推演村落连片火情蔓延规律，优化组团防火分隔距离，平衡风貌、安全与成本。集中聚居提质区以乡镇周边新建民居、连片老旧民居为主，推行被动为主、主动兜底的复合型模式，在不破坏外立面的前提下，隐蔽布设简易喷淋、烟感报警器等设备。偏远散户建设区以零散分布的独栋民居为主，秉持低成本极简防护原则，简化被动构造工艺，仅完成明火区域物理分隔、易燃构件阻燃涂层涂刷两项基础改造，配套基础灭火器、应急储水设备，以最低成本筑牢基础防火底线。分级规划模式能够精准匹配不同区域乡村项目的建设诉求，避免资源浪费与过度改造问题。

（二）中期施工：推广乡土材料与简易装配化工艺

施工阶段的材料选型与工艺模式，直接决定乡村防火项目的建设成本与落地难度，为适配乡村施工团队技术水平、控制项目造价，乡村防火更新项目应优先选用本土化易得、价格低廉、风貌适配的乡土防火材料，推广简化版装配化施工工艺，降低施工门槛，让村民自主施工、基层团队落地成为常态。

材料选型层面，优先就地取材，以当地黏土、石灰、草木灰、砂石等天然材料为基础，调配适配本土气候的无机防火涂层与防火封堵材料；防火隔墙、分户隔断优先采用再生砖石、夯土等低成本不燃材料，替代高价工业化防火板材，材料采购成本可降低 40% 以上。同时禁止盲目引进高价工业化装饰防火材料，杜绝外来材料与乡土风貌冲突、后期运维成本过高的问题，兼顾经济性与文化适配性。施工工艺层面，拆解传统复杂古法营造工艺与高阶 BIM 施工流程，推行模

块化简易装配模式。将改良版封火山墙、预制防火隔墙、标准化防火涂层划分为独立预制构件，提前在工厂完成半成品加工，运输至施工现场后直接拼装、涂刷即可；同时编制图文版简易施工手册，配套短视频教学资源，面向村民与基层施工人员免费开放，无需专业建筑师、消防工程师常驻现场，即可完成施工落地，大幅降低项目施工成本与人力投入。

（三）后期运维：构建村民自治与网格化管控模式

长效运维是保障乡村防火改造成果的关键环节，现阶段多数乡村防火改造项目存在重建设、轻运维的通病，项目改造完成后缺乏常态化管护机制，防火构件老化、消防设备失效问题频发，前期改造成果逐步流失。结合乡村基层治理体系，应构建村民自主管护+村级网格化监管的双重运维模式，搭建低成本、可持续、全覆盖的长效运维体系，补齐乡村消防运维短板。村民自主管护层面，明确民居住体管护主体，遵循“谁使用、谁管护”的基本原则，由户主负责自家防火涂层、简易消防设备、内部防火隔断的日常维护工作；村委会定期开展免费科普宣讲，普及防火构件养护技巧、设备检修方法、用火用电规范，提升村民自主管护意识。同时建立村级奖惩机制，对管护成效优异、零火情的农户给予物资奖励，对违规改造、忽视安防造成隐患的农户进行劝导整改，调动村民参与积极性。网格化监管层面，以村落街巷、组团为单元，划分若干微型消防网格，由村干部、网格员、驻村设计师组成专项巡检小组，按月开展全域隐患排查工作，重点检查公共区域消防水源、组团防火隔离带、公共被动防火构造的完好状态；针对高龄独居、留守家庭等高危群体，开展上门免费检修服务。同时依托轻量化数字化台账，记录隐患点位与整改情况，实现运维工作可追溯、可复盘，全方位保障乡村防火体系长期稳定运行。

高校通过重构融合课程体系、优化实训模式，能够培育适配新时代行业需求的复合型消防设计人才，从源头完善人才供给链条；设计院依托扁平化协同流程、分层人才梯队、复合型绩效制度，可系统性破解数字化转型难题，实现 BIM 消防协同模式规模化落地；乡村建设项目依托分级规划、乡土施工、网格化运维的成套思路，能够平衡消防安全、风貌保护与建设成本，走出适配我国乡村本土特征的防火更新道路。三类启示覆盖人才、产业、乡村三大核心维度，相辅相成、协同联动，为智慧建造时代建筑学行业全方位高质量发展提供系统性行动指南。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50016-2014 建筑设计防火规范[S]. 2018年版. 北京:中国计划出版社,2015.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 51245-2017 建筑防烟排烟系统技术标准[S]. 北京:中国计划出版社,2017.
- [3] 陈炜. 基于BIM正向设计的建筑防火审查工具研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2023,15(03):112-118.
- [4] 王其亨,王丽方. 中国传统木构建筑被动防火营造技艺探析[J]. 建筑学报,2022(05):102-108.
- [5] 周铁军,李鑫. 城乡二元视角下乡村传统聚落消防安全短板及优化策略[J]. 消防科学与技术,2024,43(02):245-251.
- [6] 李国强,张慧. 钢结构建筑火灾下结构性能及防火设计方法研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(08):1-12.
- [7] 赵勇,刘芳. 装配式混凝土建筑拼接节点防火失效机理与封堵技术[J]. 土木工程学报,2023,56(07):36-45.
- [8] 吴贤国,陈楠,李展. 基于BIM-FDS耦合的大型综合体火灾烟气疏散仿真[J]. 安全与环境学报,2022,22(04):1568-1575.
- [9] 黄艳雁,王浩. 性能化防火设计在异形公共建筑中的应用研究[J]. 建筑科学,2023,39(02):189-196.
- [10] 张毅,周晓冬. 城市更新背景下历史文化街区消防韧性提升策略[J]. 城市规划学刊,2024(01):92-99.
- [11] 刘贵应,胡睿. CIM平台下城市消防基础设施数据资产构建与应用[J]. 地理空间信息,2023,21(06):78-82+6.
- [12] 王要武,金天国. 我国建筑行业BIM技术落地障碍及人才培养体系构建[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(03):1-7.
- [13] 陈伯望,李思远. 乡村振兴背景下南方传统村落消防规划优化研究[J]. 规划

- 师,2023,39(09):112-119.
- [14] 孙澄,韩昀松. 生成式设计赋能建筑被动防火形态优化路径[J]. 建筑学报,2023(08):108-114.
- [15] 许清风,朱华. 火灾后钢筋混凝土结构损伤评估与BIM辅助修复决策[J]. 建筑结构,2022,52(15):102-109.
- [16] 周立广. 中原地区传统民居被动防火营造智慧及现代化转化[J]. 四川建筑科学研究,2023,49(04):25-31.
- [17] 张源. 高层钢结构建筑抗火性能仿真与防火包覆优化设计[J]. 工程抗震与加固改造,2024,46(01):135-141.
- [18] 高明. EPC模式下大型公建项目全生命周期消防BIM运维管理[J]. 施工技术,2023,52(11):89-94.
- [19] 李冰,肖泽荣. 低碳视角下可持续建筑主动与被动防火协同设计[J]. 建筑节能,2024,52(03):56-62.
- [20] 王静峰,沈万岳. 装配式钢混组合构件高温力学性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(05):45-53.
- [21] 丁烈云. 数字建筑:智能建造理论与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021:156-189.
- [22] 范维澄. 建筑火灾安全工程导论[M]. 3版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2020:98-135.
- [23] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心. BIM技术在建筑消防领域应用白皮书[R]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [24] BAE S,CHA H,JIANG S. IFC-BIM-Based Fire Information System for Enhancing Preventive Building Maintenance[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2025,39(02):04025017.
- [25] KIM J,PARK J. Performance-Based Fire Design Optimization of Complex Atrium Buildings Using BIM[J]. Fire Safety Journal,2023,138:103987.
- [26] LEE S,CHOI Y. Full-Life-Cycle Fire Operation and Maintenance Strategy of Prefabricated Buildings Based on Digital Twin[J]. Automation in Construction,2024,156:105124.
- [27] ZHANG L,WU P. Rural Settlement Fire Risk Assessment and Differentiated

- Prevention Strategy Under Urban-Rural Integration[J]. Journal of Rural Studies,2023,92:215-224.
- [28] CHEN M,LIU H. Research on Transformation Path of Architectural Fire Protection Design Paradigm Driven by BIM Digital Technology[J]. Buildings,2024,14(05):1452.

