

构建智慧消防系统检测评估框架的理论必要性研究

——以复杂建筑群为背景

费超¹ 李健岗² 褚响³

1.江苏华普消防技术服务有限公司 江苏 徐州 221000

2.中国致公党徐州市委员会 江苏 徐州 221000

3.江苏华普消防技术服务有限公司 江苏 徐州 221000

【摘要】：近年来，由于城市的高密度开发，复杂建筑群不断涌现，其消防系统已由传统分散式设施向高度集成的智慧化网络结构转型。然而，现行消防设施检测评估模式仍以设备功能合格性为核心，难以识别由结构耦合、通信延迟、关键节点过载及协议不兼容等引发的系统级风险。本文以复杂系统理论为基础，分析智慧消防系统的结构特征与传统检测模式的局限性，从结构性盲区、系统演化风险累积及制度性缺失三个层面论证构建系统级检测评估框架的理论必要性。通过框架建构，将消防安全评价从“设备可靠性”层面提升至“系统韧性”层面，实现从“静态功能合格”向“动态结构安全”的评价范式转型，为智慧消防系统检测评价理论体系的完善提供理论支撑。

【关键词】：智慧消防系统；复杂建筑群；系统级检测；检测评估框架；复杂系统理论

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.007

1 引言

城市高密度开发催生了大量大型综合体、产业园区及轨道交通枢纽等复杂建筑群，建筑消防系统随之由传统分散式设施向以物联网、云平台与集中控制为基础的智慧消防体系演进，多子系统在统一数据平台上实现跨楼宇、跨系统的协同运行，消防系统的安全性已不再仅取决于单一设备性能，而取决于系统整体结构稳定性与联动逻辑协调性。然而，现行消防设施检测评估模式仍以设备功能合格性为核心进行达标检查，其中强调的是单元测试与规范符合性判定，在系统规模较小、耦合程度较低的传统条件下虽具适用性，但在子系统间形成大量密集信息交互后，仅依赖各构件之间的检测已难以识别系统层面的结构性风险。之前有学者就曾列举过智慧消防技术在不同建筑类型中的适用性及其面临的挑战与优化策略，明确显示了智慧消防系统在提升建筑火灾安全管理效率和响应速度方面的重要价值。

近年来部分火灾事故表明，在设备基本完好的情况下，仍可能因通信延迟、中断、联动逻辑冲突或平台负载异常进而导致报警响应失效，从整体看，风险来源已呈现网络化与系统化特征。由此可见，传统检测模式与智慧消防系统实际运行状态之间已出现根本性错位。那么，从复杂系统理论视角出发，重新审视其风险生成机制并构建能够识别系统级结构风险的检测评估框架，已成为亟需回应的理论问题。

2 复杂系统理论基础与智慧消防系统的结构特征

复杂系统理论思想萌芽于20世纪40年代，美籍奥地利理论生物学家冯·贝塔朗菲提出一般系统论，倡导以整体性视角研究系统行为。此后，普里高津的耗散结构理论、哈肯的协同

学等自组织理论拓展加深了人们对于系统演化的认知过程。20世纪80年代，以美国圣塔菲研究所的建立为标志，复杂性科学作为一门独立的学科开始出现，并于1994年，约翰·霍兰在该所正式提出复杂适应系统理论，标志着复杂系统理论走向成熟。该理论的核心命题在于：由大量相互作用个体构成的系统，其整体行为无法通过对个体的逐一分析来预测；当系统节点规模与连接密度达到一定临界水平后，系统整体将涌现出非线性、自组织性和适应性等个体层面所不具备的特征。这一理论超越了传统“还原论”思维，为分析网络化系统的结构与功能提供了全新范式。

从结构上来看，智慧消防系统的构成与复杂系统理论研究的对象十分契合。多子系统耦合、多路径信息流动与闭环反馈等特征，使其整体行为无法通过对各设备单元的逐一检测来预测。智慧消防系统一般包括火灾自动报警系统、自动灭火系统、防排烟系统、电气火灾监控系统以及集中管理平台等多个子系统，上述各子系统之间均存在以通信协议及数据接口为纽带形成的多路径联动结构。当系统规模扩大、节点数量增加时，系统耦合度显著提高，一方面增强了系统响应能力，另一方面也提高了风险传播的可能性。系统内部报警信号经平台处理后触发联动控制，联动结果再通过感知层反馈至平台形成闭环，当反馈路径过长或耦合度过高时，可能出现响应延迟或过度响应。由此可见，智慧消防系统的整体安全性并非各子系统可靠性的简单叠加，而是通过结构关系生成整体表现。那么，从复杂系统理论角度去阐述，传统“还原论”检测逻辑之所以失效，根源在于其预设了系统各组成部分相互独立，而智慧消防系统的实际运行状态恰恰与此相反。

3 传统检测模式在复杂系统环境下的局限

传统消防检测的核心目标为设备性能达标,通过功能测试判定各个子系统是否达到规范性标准,强调局部验证却忽略了系统的结构关系。传统检测在逻辑上预设了系统各组成部分之间相互独立、互不影响,然而在智慧消防系统中,各子系统之间通过通信协议与数据接口形成密集的信息交互,任一节点的状态变化均可能引起关联节点的连锁响应,这种预设与实际运行状态之间的根本性错位,构成了传统检测模式系统性失效的理论根源。

简言之,现有检验方法的局限性表现在三个方面:未考虑网络拓扑结构特征,无法识别节点连接关系与信息流动路径中的潜在风险;无法识别关键节点脆弱性,对集中管理平台等核心节点的负载极限与单点故障风险缺乏评估手段;未能评估系统在扰动条件下的韧性水平。这三个层面的缺失并非相互孤立,而是逐层递进的——结构分析的缺失导致关键节点无法被识别,关键节点的管理空白又进一步导致系统韧性无法被评估,最终形成从静态检测到动态安全能力的完整盲区。

复杂系统理论明确指出,当系统节点数量与连接关系达到一定程度以后,系统行为可能呈现非线性放大效应。在智慧消防系统中,一个传感元件的细微误差有可能经过平台逻辑运算以及多层反馈之后逐步放大,最终导致大面积的误联动或者误延时现象。国内部分大型商业综合体在整改通报中曾指出,不同分区报警子系统接入统一平台时存在协议适配问题,导致部分区域排烟系统未能按预期启动,该问题在单体检测阶段未被发现。系统可靠性理论进一步表明,在网络结构中,关键节点的可靠性对整体系统稳定性具有决定性影响。集中管理平台承担信息汇聚与指令分发功能,一旦其负载接近性能阈值,数据传输时间会成倍增长。同时,复杂建筑群往往分期建设,初始设计阶段的拓扑结构若存在薄弱环节,在后续扩展中可能被不断强化,形成路径依赖与结构锁定。有学者在 2004 年即指出,我国火灾自动报警系统普遍存在不同厂家、不同系列产品互不兼容的问题。

从中央安全生产考核巡查组公开通报的情况看,在云南省文山州和谐世界城,高层建筑中有医院、酒店等 40 多个经营主体,由于物业没有对消防系统进行统一管理,消防控制室断电、消火栓无水,造成整个消防系统瘫痪。该案例如同上所述,虽然各个经营主体都有灭火器等基本消防设备,从单元检测角度看似乎具备防火条件,然而系统层面的管理架构完全缺失,所有设备实际上无法发挥任何作用。上述案例表明,系统的整体安全性并非各子系统安全性的简单叠加,一个看似微小的管理缺位或操作失误便可通过系统结构的耦合关系被逐级放大,最终导致整体功能失效。

4 构建系统级检测评估框架的必要性

综上所述,传统检测模式在复杂建筑群环境下已无法全面反映智慧消防系统的真实安全水平。构建系统级检测评估框架的必要性可从三个层面加以认识:传统检测模式的结构性盲区、智慧消防系统结构演化的风险累积趋势,以及现行消防风险评估体系的制度性缺失。

传统检测模式存在固有的结构性盲区。传统检测基于“单元合格”的基本逻辑,其有效性建立在系统各组成部分相互独立的假设之上。然而,智慧消防系统的实际运行状态恰恰呈现高度耦合、多路径反馈的网络化特征,其整体功能不仅取决于各组件的完好状态,更取决于各部件间耦合关系的有效性、信息传递的通畅性和控制逻辑的一致性。当系统规模较小、耦合程度较低时,部件完整度与系统可靠性的差距并不显著;而当系统演化至高度耦合的网络结构后,这一差距急剧扩大,成为决定系统整体安全水平的关键变量。传统检测的逻辑预设与系统的实际运行状态之间存在根本性错位,无论单元检测如何严格,都无法覆盖系统层面的结构风险。这一结构性盲区的存在,构成了构建新框架最根本的理论动因。

智慧消防系统结构演化的趋势使系统级风险持续累积。复杂建筑群往往采取分期建设模式,消防系统在长期运行过程中呈现动态扩展特征。当新增节点、子系统加入后,网络结构及链接复杂性随之提高。根据复杂系统演化原理,系统演化中会出现路径锁定与结构固化现象,即在初期形成的网络拓扑结构、接口关系难以改变,这又会对后期的延伸形成不断的制约条件,前期设计的隐形弊端会在后期大规模应用中被逐级放大。与此同时,不同时期、不同厂商的设备接入同一平台后,因通信协议差异与数据格式不统一而产生的结构耦合风险也在同步累积。这类风险具有隐蔽性,在系统运行初期阶段可能并不显现,但随着系统规模跨越临界阈值,微小扰动便可能通过耦合路径引发级联效应。传统检测难以动态过程中出现的风险作出判断,亟需建立能够对系统结构进行周期性审视的评价机制。

当前消防风险评估体系中缺乏面向系统结构的评价环节。现有消防技术标准与检测规程涵盖设备进场检验、安装调试、竣工检测及定期维保等环节,但上述所有环节均以设备单元为检测对象,以“合格/不合格”为判定结论,而未形成对整个系统结构进行评价的标准指标与检测方式。这是一个关键的制度性缺失——当系统已明确呈现出复杂网络特征,而评价仍停留在单元层级时,评价的有效性必然受到根本性质疑。系统级检测评估框架的构建,并非对传统检测的替代,而是在其基础上补充一个更高层级的评价维度,使消防安全的评价逻辑从“单元合格”升级为“结构健康”。

这一趋势在国际消防标准领域已有所体现。2025 年 6 月,

美国国家消防协会 (National Fire Protection Association, 简称 NFPA) 在技术会议上正式批准了《便携式灭火器标准》(NFPA 10) 2026 年版, 该标准在 Section 7.2 中删除了月度巡检过程中“提举”灭火器的人工操作要求, 明确允许采用电子监控系统作为人工月度物理巡检的替代方案。这意味着消防灭火器的状态确认方式正从依赖人工的“单元级”物理检查, 转向依赖技术系统的持续监测。这一调整表明, 即使像单个灭火器这样简单程度的产品, 在国际标准层面上也开始接受技术化的验证手段其效率及可靠性; 而对于复杂程度远远超过智慧消防系统的其他系统来说, 构建面向系统整体的技术化的检测评价体系就显得更加重要和迫切了。

综上, 构建系统级检测评估框架具有明确的理论必要性与现实紧迫性。这一判断并非否定传统检测的价值, 而是基于对智慧消防系统结构特征与风险演化规律的深入分析所得出的必然结论。李琪等学者也进一步表明, 智慧消防是用数字化手段和技术替代原有消防系统的信息化手段和技术, 是消防治理体系和治理方式的根本性变革。在系统形态发生质变的前提下, 评价逻辑也要随之作出相应的改变, 否则消防安全管理永远会有一个不能覆盖的结构性盲区。

参考文献:

- [1] 邱霞, 浅析智慧消防技术在不同建筑类型中的适用性[J], 现代职业安全, 2026(01), P103-104.
- [2] [美] 约翰·H·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性[M]. 周晓牧, 韩晖, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2019.
- [3] [美] 约翰·H·霍兰. 自然与人工系统中的适应: 理论分析及其在生物、控制和人工智能中的应用[M]. 张江, 译. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [4] 辛本顺. 火灾自动报警系统兼容化探讨[J]. 消防科学与技术, 2004(1): 76
- [5] 李琪、陈延龙、秦静、钟龙辉、蔡彦坡. 智慧消防演进路径研究与未来展望[J], 今日消防, 2025, 10-(12): 15-20.

5 结论

在复杂建筑群环境下, 智慧消防系统已演变为多层级耦合网络结构, 风险生成机制由单点设备故障转向结构耦合与信息失效。传统检测模式遵循还原论逻辑、聚焦单元合格判定, 虽仍具基础性作用, 但已无法全面反映系统的整体安全水平。

本文从复杂系统理论、系统可靠性理论与系统韧性理论出发, 分析了智慧消防系统的结构特征与传统检测模式的局限, 论证了构建系统级检测评估框架的必要性。这一必要性源于三个方面: 传统检测模式存在固有的结构性盲区, 无法覆盖系统层面的风险; 智慧消防系统结构演化使系统级风险持续累积, 亟需周期性审视机制; 现行消防风险评估体系缺乏面向系统结构的评价环节, 存在制度性缺失。系统级检测评估框架的构建, 本质上是将消防安全评价从“设备可靠性”提升至“系统韧性”层面, 实现从“静态功能合格”向“动态结构安全”的范式转型。

未来研究可围绕结构脆弱性评价指标的量化建模、多场景仿真验证及工程试点应用等方向展开, 推动框架从理论构建走向工程落地, 为智慧消防系统的长期稳定运行提供更为坚实的评价理论支撑。