

基于 ASET-RSET 模型的养老机构火灾疏散失效机理与预控体系研究

翟彤辉

西南石油大学 土木与测绘学院

DOI:10.32629/btr.v8i7.4870

[摘要] 在人口老龄化加剧与社会化养老需求快速增长的背景下,养老机构作为高龄、失能群体集中的特殊场所,其火灾安全形势日益严峻。本文基于安全系统工程理论,聚焦于火灾疏散中的核心矛盾——时间竞争,运用ASET-RSET模型深入剖析了养老机构疏散失效的动力学机理。研究发现,建筑内部高危火灾荷载与老年人低耐受阈值耦合导致可用安全疏散时间(ASET)显著缩短,而因认知障碍导致的预动作时间滞后及夜间管理资源匮乏造成的响应延迟,共同导致了难以调和的疏散“时间赤字”(RSET>ASET)。针对传统垂直疏散模式的局限性,本文提出了以“空间换时间”为核心的水平疏散重构策略,并从管理流程优化与技术应用维度,构建了包含风险分级响应、全时段监测及实战化应急演练的综合预控体系,旨在为提升养老机构本质安全水平提供科学的解决方案。

[关键词] 养老机构; 火灾疏散; 安全系统工程; ASET-RSET模型; 失效机理

中图分类号: TU246.2 文献标识码: A

Research on the Failure Mechanism and Pre-control System of Fire Evacuation in Elderly Care Institutions Based on the ASET-RSET Model

Tonghui Zhai

SouthWest Petroleum University, School of Civil Engineering and Geomatics

[Abstract] Addressing the high fire vulnerability and evacuation difficulties in elderly care institutions within the context of an aging population, this paper applies engineering management system theory, vulnerability analysis, and the ASET-RSET time competition model. It reveals the evacuation "time deficit" ($RSET > ASET$) contradiction caused by the physiological and cognitive decline of the elderly and deficiencies in night management. The study indicates that the traditional vertical evacuation mode is no longer suitable for incapacitated elderly groups, necessitating a shift towards a comprehensive pre-control mode featuring "space for time" and "human-technology synergy." Consequently, this paper proposes a spatial reconstruction strategy centered on horizontal evacuation and shelter-in-place, and establishes a dynamic management system incorporating risk classification based on elderly physical function, 24/7 IoT monitoring, and standardized emergency response.

[Key words] Elderly care institutions; Fire evacuation; Vulnerability analysis; ASET-RSET model

引言

随着我国老龄化程度的持续加深,各类敬老院、老年公寓及医养结合中心迅速兴起,已成为支撑老龄社会的重要基础设施。然而,与普通民用住宅或商业建筑不同,养老机构服务对象主要为高龄、失能、半失能或患有认知障碍的老年群体,此类群体因生理机能衰退及自救能力弱,属于典型的火灾弱势群体^[1]。近年来,国内外养老机构火灾频发,造成严重伤亡和财产损失。事故调查显示,随着医疗护理功能的增加,大量医用织物、氧气设备

及医疗设施的使用显著增加了建筑内部的火灾荷载,加之夜间护理力量薄弱、应急预案脱离实际,导致传统的以“跑出楼外”为目标的疏散模式在紧急时刻往往失效。因此,如何构建一套既符合国家防火标准、又契合失能老人管理实际的火灾预控体系,已成为亟待解决的课题。

目前,学术界针对养老机构火灾安全的研究主要遵循“人员特性分析—风险模型构建—防控对策优化”的逻辑路径。在风险诱因方面,沈良俊^[2]指出认知障碍与社会支持不足是推高火

灾风险的关键因素;在风险评估方面,薛琪^[3]利用多层次模糊综合评价法确立了安全评价权重体系,马鑫悦^[4]则结合熵权TOPSIS法与改进的FRAME法实现了风险等级的量化。在工程对策层面,庄凌等^[5]针对现行规范不足,主张结合护理等级差异制定疏散宽度指标;罗开洲与綦韦^{[6][7]}利用BIM及火灾仿真软件证实,除了硬件改造外,优化护患比、配置软担架等管理手段能显著提升疏散安全性。然而,既有研究多侧重于静态硬件设施的优化或基于理想工况的数值模拟,缺乏将工程技术与管理流程深度融合的系统性研究,鉴于此,本文不再局限于对风险因素的静态描述,而是聚焦于火灾疏散的时间竞争(RSETvsASET)核心矛盾,基于安全系统工程视角,深入剖析导致疏散系统失效的动态机理,并据此构建一套融合空间重构与流程再造的综合预控体系。

1 理论基础与研究方法

1.1 安全系统工程与“4M”要素分析

本文的研究逻辑基于安全系统工程的基本原理。该理论认为,事故的发生并非单一因素作用的结果,而是系统内部各要素相互耦合、故障叠加的产物。在养老机构的火灾安全系统中,本文引入经典的“人-机-环-管”(4M)要素分析模型,将火灾疏散视为一个多维度的动态过程^[8]。

人(Man):指入住老人及护理人员,重点关注老年人的生理衰退、认知障碍以及护理人员的应急能力。

机/物(Machine/Material):指建筑内的物质实体,包括高危火灾荷载、助燃源及消防设施。

环(Media/Environment):指建筑空间环境,涵盖空间布局、防火分区、排烟条件及门禁系统的封闭性。

管(Management):指管理机制,包括应急预案、值班制度、培训演练及组织响应速度。

1.2 ASET-RSET时间竞争模型

为了定量评估疏散安全性,本文采用性能化防火设计中核心的ASET-RSET时间竞争模型。该模型将人员能否安全疏散的判断定义为:可用安全疏散时间必须大于必需安全疏散时间。即:

$$Safety\ Margin = ASET - RSET > 0$$

其中,ASET取决于火灾发展速率及有毒烟气对人体的致死阈值;RSET则由探测报警时间($T_{det}+T_{warn}$)、预动作时间(T_{pre})和运动时间(T_{trav})构成。当安全裕度(Safety Margin<0)为负值时,即判定为疏散失效。本文将重点剖析在养老机构特定场景下,该不等式为何难以成立。

2 基于ASET-RSET模型的疏散失效机理分析

本章运用“人-机-环-管”四要素分析法,深入解剖导致养老机构安全裕度趋负(即失效)的深层机理。

2.1 ASET的显著缩短:高危环境与低耐受性的耦合效应

可用安全疏散时间(ASET)是由火灾环境的恶化速度与人员对环境的耐受能力共同决定的。在养老机构中,这两方面均处于不利状态。

从“机”与“环”的维度审视,养老机构呈现出“医养结合”

带来的特殊高危火灾荷载特征。为了满足居住舒适性,老人房间内普遍配备大量棉麻织物等易燃且发烟量大的介质,火灾类型多为发展极快的 t^2 火。一旦起火,这些易燃材料会在短时间内释放出大量含有氰化氢(HCN)、一氧化碳(CO)等剧毒成分的高温浓烟。此外,医疗区域广泛分布的医用氧气瓶、制氧机等助燃设备,极易使初期的阴燃迅速转化为剧烈的富氧燃烧,从而导致火场温度和热辐射强度呈指数级上升。

从“人”的维度来看,老年群体对火灾产物的耐受阈值较低。由于呼吸系统与心脑血管系统的生理性衰退,老年人对缺氧和毒性气体的敏感度远高于健康成年人。这意味着在同样的烟气浓度下,常人可能尚未出现明显症状,而老年人可能已陷入昏迷或死亡。种种因素直接导致ASET的时间窗口显著缩短,往往在火势尚未蔓延至房间时,毒烟已成为致死的主因。

2.2 RSET的异常延长:关键时间节点的累积性滞后

必需安全疏散时间(RSET)由探测、报警、预动作及运动四个阶段构成。在养老机构中,由于管理资源匮乏与人员认知障碍的制约,各时间节点均出现了严重的累积性滞后。

(1)探测与报警阶段($T_{det}+T_{warn}$)的延迟。虽然现代建筑普遍安装了感烟探测器,但在养老机构的实际运行中,夜间管理的薄弱成为了主要问题。目前绝大多数机构受限于运营成本,夜间护理人员与老人的配比(护患比)较低。当夜间火灾报警控制器动作时,仅有的值班人员面临着确认火情、拨打119报警、尝试初期灭火以及通知其他人员的多重任务冲突。这种不对称的任务负荷极易导致人工确认过程的显著延迟,从而拉长了火灾发展的自由燃烧期。

(2)预动作时间(T_{pre})的不可控性。这是养老机构疏散中最具不确定性的变量。对于身体机能完好的成年人, T_{pre} 仅涉及识别警报和开始行动。但失能老人需要等待护工到达房间、解除医疗设备连接(如氧气管、导尿管)、协助穿衣并进行移位准备(如从床移动至轮椅)。这一过程高度依赖有限的人力配置,导致 T_{pre} 在总疏散时间中占比极高且波动巨大。

更为严重的是认知障碍带来的负面影响。患有阿尔茨海默症的老人面对强烈的声光报警刺激时,其大脑信息处理能力不足以完成从感知信号、判断危险到执行逃生的全过程。相反,强烈的应激反应可能引发“认知冻结”现象,使老人呆坐在床上无法动弹;或者出于对陌生环境(如充满烟气的走廊)的恐惧,本能地选择躲入衣柜、床底等封闭空间。这种非理性行为不仅增加了其自身中毒风险,更增加了救援人员的搜救难度和时间消耗。

(3)运动时间(T_{trav})的倍增。运动时间取决于人员的移动速度和疏散距离。老年人因肌肉力量衰退,水平移动速度远低于常人(通常 $V<0.5m/s$)。在垂直疏散场景下,若电梯停用,老年人极易在楼梯入口处形成拥堵节点。黄丽蒂等^[8]的模拟研究数据表明,在全员疏散场景下,火灾发生后120~150秒内二楼楼梯口即出现严重拥堵,整体疏散耗时可达302秒以上。这意味着在火灾初期的关键窗口内,绝大多数老人无法凭借自身能力完成物理

空间的转移,若涉及轮椅或担架搬运,楼梯间的通行效率将进一步降低, T_{trans} 甚至可能趋近于无穷大。

综上所述,ASET的显著缩短与RSET的无限延长,导致养老机构疏散系统中的安全裕度往往呈现负值,这是导致群死群伤事故发生的根源。

3 养老机构火灾安全预控体系构建

基于上述机理分析,单纯通过提升老年人行动速度来满足疏散要求并不现实。工程管理的核心策略应转向“被动防火”与“主动管理”的深度融合,即通过空间物理环境的重构延长ASET,通过管理流程的标准化缩减 T_{pre} ,从而在时间竞争中获得优势。

3.1 空间策略: 构建以水平疏散为主的防御体系

针对垂直疏散实施困难的问题,建筑防火设计应突破传统的“疏散至室外”思维,确立“就地避难”和“水平疏散”为核心的空间策略。

第一,建立严格的防火分区与相对安全区。利用耐火极限不低于2小时的防火墙和甲级防火门,将单一楼层划分为若干独立的相对安全区。火灾发生时,疏散策略不是引导老人向下奔跑,而是横向转移至相邻的防火分区。这种策略将长距离的垂直疏散转化为短距离的水平位移,不仅能将运动时间(T_{trans})缩减70%以上,更能有效避免楼梯间拥堵造成的次生伤害。

第二,强化“避难间”的功能性配置。在失能老人集中区域,每层应设置具备正压送风系统、独立排烟设施的临时避难间。该空间作为安全区域,在外部救援到达前为无法移动的老人提供不少于1小时的生存窗口,通过物理隔离手段有效延长ASET。

3.2 管理流程: 建立基于风险分级的应急响应机制

硬件设施的完善仅是基础,针对 T_{pre} 过长的管理薄弱环节,必须建立标准化的应急响应程序。

第一,实施“红黄绿”风险分级标识管理。建议在每一位老人的床头卡及房门处设置醒目的疏散等级标识:绿色代表可独立行走,黄色代表需器械辅助,红色代表完全失能。在火灾发生的初期,这一标识系统能指导护理人员优先引导绿色等级老人自行撤离,随即集中力量搬运红色等级老人,通过标准化的决策流程减少现场犹豫时间。

第二,构建夜间“网格化”值守与联动机制。针对夜间护患比低的现状,管理上应改变传统的固定岗哨模式,采用基于优化算法的流动巡查路线,确保任一盲区在15分钟内至少被覆盖一次。同时,应建立“邻里互助”的岗位联动机制,一旦某网格触发警报,相邻网格的护理员应立即按预案转换为“应急搬运组”,形成局部的人力优势资源,填补夜间救援力量的不足。

3.3 技术支持: 物联网技术的全时段监测应用

为了弥补人工巡查的不足,应引入物联网技术实现全时段的“感知-预警”联动,最大限度压缩探测时间(T_{det})。对于重点区域,应采用复合型火灾探测器(烟温复合+视频图像分析),以降低单一烟感在潮湿环境下的误报率。此外,针对听力衰退的老年群体,报警终端应进行适应性改造。结合智能穿戴设备(如健

康手环),在火警触发时通过手环强震动及定向语音提示进行“点对点”唤醒,解决传统声光报警无效的问题。同时,智能门禁系统应与消防主机实现无延迟联动,在火警确认瞬间自动释放所有门禁权限,并在地面投影动态发光疏散指示图标,为视力模糊的老人提供直观的导视路径。

3.4 能力建设: 实战化的应急演练

最后,人员的应急能力是系统韧性的关键。工程管理视角下的培训应从形式化转向实战化。演练内容应重点聚焦于极端的“最不利场景”,例如“夜间断电+浓烟环境+只有两名护工”的极限压力测试。护工不仅要掌握灭火器使用,更需熟练掌握“床单疏散法”、“双人搬运法”等针对失能老人的疏散技能。同时,应对部分认知能力尚可的老人进行定期的心理适应训练,通过模拟低强度的警报声响,降低其在真实火灾中的应激反应,从而在心理层面构建一道防御防线。

4 结论

养老机构的火灾安全治理是一项复杂的系统工程。本文基于安全系统工程视角的研究表明,受限于老年群体的生理衰退与认知障碍,以及“医养结合”模式下复杂的物质环境特征,传统单一的垂直疏散范式在养老机构中已难以适用,面临严峻的“时间赤字”(RSET>ASET)挑战。解决这一核心矛盾的关键,在于构建“空间重构”与“管理优化”深度融合的防控体系:即在硬件层面,通过确立以“水平疏散”和“就地避难”为主导的空间策略,利用防火分区与避难间构建“相对安全区”,以物理空间的阻隔争取生存时间;在管理层面,运用基于身体机能分级与物联网监测的“人技协同”响应机制,通过标准化的流程填补夜间监管的空白,实现从被动应对向主动预控的转变。

[参考文献]

- [1]肖方.老人:火灾中的弱势群体[J].中国消防,2015,(12):14-15.
- [2]沈良俊.上海市老年群体社区火灾风险防控策略研究[D].华东政法大学,2024.
- [3]薛琪.养老机构安全风险评价研究[D].西安建筑科技大学,2017.
- [4]马鑫悦.养老机构火灾风险评估及保险研究[D].沈阳航空航天大学,2023.
- [5]庄凌,鄢恩田,李洁,等.新规下养老建筑安全疏散与避难空间设计[J].消防科学与技术,2017,36(11):1512-1514.
- [6]蔡韦.基于速度修正的高层老年公寓火灾疏散策略及应用研究[D].沈阳建筑大学,2023.
- [7]罗开洲.老年公寓性能化防火设计研究[D].东北石油大学,2021.
- [8]黄丽蒂,罗开洲,刘莹,等.老年公寓火灾场景人群疏散模拟[J].中国安全科学学报,2020,30(03):137-142.

作者简介:

翟彤辉(1994--),男,汉族,河南省林州市人,硕士研究生在读,研究方向:工程管理。