

Risk Analysis and Evaluation of Tethered Fire-fighting UAV in High-rise Building Fire-fighting

Yaqi Wang Jingtai Wu*

Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

Frequent occurrence of fires in high-rise buildings in cities, with fast spread and complex internal structures, pose significant challenges to firefighting in high-rise buildings. The paper focuses on the relativity and fuzziness of performance index risk analysis and evaluation of tethered firefighting unmanned aerial vehicle systems. A systematic risk evaluation index system for tethered firefighting unmanned aerial vehicle systems is constructed, and the weight of each index is calculated using the analytic hierarchy process. A fuzzy comprehensive evaluation model is established to analyze the major risk factors that affect the use of tethered firefighting unmanned aerial vehicles in high-rise buildings. This provides a quantitative basis for firefighting and rescue personnel to understand the effectiveness of tethered firefighting unmanned aerial vehicle systems and for related scientific researchers to improve and perfect them.

Keywords

tethered UAV; high-level fire fighting; risk analysis; fuzzy comprehensive evaluation

系留式消防无人机在高层建筑灭火中的风险分析与评价

王雅绮 吴景泰*

沈阳航空航天大学, 中国 · 辽宁 沈阳 110000

摘 要

城市中高层建筑火灾频繁发生, 其蔓延速度快, 建筑物内部结构复杂等特点都给高层建筑灭火带来了较大的挑战。论文针对系留式消防无人机系统性能指标风险分析与评价的相对性和模糊性, 系统地构建系留式消防无人机风险评价指标体系, 运用层次分析法计算每项指标的权重, 建立模糊综合评价模型, 分析影响系留式消防无人机在高层建筑中灭火的较大风险因素, 为消防救援人员了解系留式消防无人机系统使用效能以及相关科研工作者进行完善和改进提供定量的依据。

关键词

系留无人机; 高层灭火; 风险分析; 模糊综合评价

1 引言

近年来, 由于城市中高层建筑火灾事故发展速度迅猛, 内部结构复杂, 造成人员伤亡和财产损失大等特点, 导致实际的火灾扑救工作难度较大, 高层建筑火灾也成为消防安全管理工作的重中之重^[1]。为加强城市中高层建筑灭火救援水平, 消防无人机应运而生且在消防救援领域发挥着越来越重要的作用。

论文主要研究系留式消防无人机在高层建筑灭火中的风险。首先根据系留式消防无人机在高层建筑灭火演练中的使用经验建立消防无人机在灭火效能风险评价指标体系, 然

后, 运用层次分析法^[2]确立灭火效能风险评价体系中各项指标的比重, 运用模糊综合评价法^[3]对相应指标进行量化计算, 最终对系留式消防无人机在高层建筑灭火效能风险的量化指标进行有效的综合分析评价。

2 系留式消防无人机灭火效能风险评价指标体系

2.1 灭火效能风险评价指标

系留式消防无人机主要用来实现对高层建筑火灾的精准灭火, 可以把系留式消防无人机在高层建筑中灭火的风险分析看作是一个层次化的体系结构。如某系留式消防无人机在高层建筑灭火风险评价的一级指标为: 机体性能、导航能力、保障能力、人员因素、环境因素。通过确立一级指标的影响因素来分析判断相应的二级指标, 如图 1 所示。

【作者简介】王雅绮 (1995-), 女, 中国辽宁沈阳人, 硕士, 从事安全风险分析与控制、安全科学与工程研究。

【通讯作者】吴景泰 (1964-), 男, 中国辽宁鞍山人, 博士, 教授, 从事安全投资与决策研究。

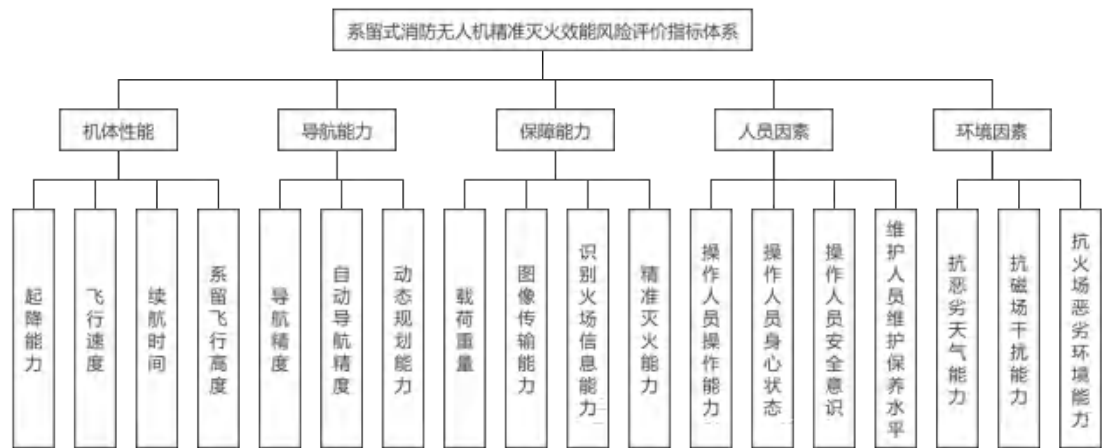


图 1 某系留式消防无人机精准灭火效能风险评价指标体系

2.2 应用层次分析法计算灭火效能风险评价指标权重

在系留式消防无人机灭火效能风险评价指标体系中，不同因素指标对其影响程度是不同的。本文运用层次分析法理论来确定各风险因素的权重关系，并给各风险因素赋予不同的权重。

①建立层次结构模型：将系留式消防无人机灭火风险设置为目标层；选取机体性能、导航能力、保障能力、人员因素、环境因素五个方面作为第一层指标体系；将准则层内容进一步分为十八个因素作为第二层指标体系。

②构造判断矩阵：论文根据一致矩阵法，即构造两两比较的判断矩阵。其中各因素数据是通过反复询问相关领域专家，通过其相关专业知识和经验对任意选择的两个元素进行比较，判断两个元素谁更重要。然后对重要性程度按数字1~9赋值^[4]，如表1所示。

表 1 重要性标度含义表

重要性标度	含义
1	表示两个元素相比，重要性相同
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述判断的中间值
倒数	设元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 的重要性之比为 a_{ij} ，那么设元素 <i>j</i> 与元素 <i>i</i> 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

在反复询问专家之后，确定系留式消防无人机灭火效能风险评价指标体系不同层级的判断矩阵，如表2~表7所示。

③计算判断矩阵的最大特征值及特征向量^[5]。评价体

系中各因素的权重采用和积法来求解。

将判断矩阵按列进行归一化处理得到归一化矩阵^[6]：

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_{jk}}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

将处理后的判断矩阵按行相加：

$$\bar{\omega}_i = n \sum_{j=1}^n \bar{A}_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

再将进行正规化处理，得到为所求特征向量。

计算矩阵特征值 $\lambda_{\max}$ ：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$$

④判断矩阵的一致性检验，计算一致性指标CR。根据CR的值确定判断矩阵是否通过一致性检验。当CR=0时：表明完全一致；当CR<0.1时：表明一致性可以接受；当CR>0.1时：表明不符合一致性。各判断矩阵具体结果如表2~表7所示。

表 2 第一层指标体系权重U1、U2、U3、U4、U5的计算

	U1	U2	U3	U4	U5	ω	一致性检验指标
U1	1	1/2	1/3	2	2	0.1490	$\lambda=5.1605$
U2	2	1	1/2	3	3	0.2499	CI=0.0401
U3	3	2	1	4	5	0.4182	RI=1.12
U4	1/2	1/3	1/4	1	3	0.1144	CR=0.0358
U5	1/2	1/3	1/5	1/3	1	0.0685	

表 3 第二层指标体系权重 U11、U12、U13、U14 的计算

	U11	U12	U13	U14	ωO	一致性检验指标
U11	1	2	1/3	1/4	0.1409	$\lambda=4.1858$
U12	1/2	1	1/3	1/3	0.1042	CI=0.0619
U13	3	3	1	2	0.4265	RI=0.90
U14	4	3	1/2	1	0.3284	CR=0.0688

表 4 第二层指标体系权重 U21、U22、U23 的计算

	U21	U22	U23	ωO	一致性检验指标
U21	1	3	1/2	0.3338	$\lambda=3.0538$
U22	1/3	1	1/3	0.1416	CI=0.0269
U23	2	3	1	0.5247	CR=0.0464

表 5 第二层指标体系权重 U31、U32、U33、U34 的计算

	U31	U32	U33	U34	ωO	一致性检验指标
U31	1	1/5	1/7	1/3	0.0604	$\lambda=4.0192$
U32	5	1	1/2	2	0.2879	CI=0.0064
U33	7	2	1	3	0.4894	RI=0.90
U34	3	1/2	1/3	1	0.1623	CR=0.0071

表 6 第二层指标体系权重 U41、U42、U43、U44 的计算

	U41	U42	U43	U44	ωO	一致性检验指标
U41	1	2	3	1/2	0.2867	$\lambda=4.0458$
U42	1/2	1	2	1/2	0.1836	CI=0.0153
U43	1/3	1/2	1	1/4	0.0972	RI=0.90
U44	2	2	4	1	0.4325	CR=0.0170

表 7 第二层指标体系权重 U51、U52、U53 的计算

	U51	U52	U53	ωO	一致性检验指标
U51	1	2	1/2	0.2973	$\lambda=3.0092$
U52	1/2	1	1/3	0.1638	CI=0.0046
U53	2	3	1	0.5390	CR=0.0079

通过计算可以得到各判断矩阵的一致性指标 CR 值均小于 0.1, 因此上述矩阵均为有效矩阵。通过表 2 至表 7 所示, 可以分别得到各级因素的权重 A:

$$A_0 = [0.1490 \ 0.2499 \ 0.4182 \ 0.1144 \ 0.0685]$$

$$A_1 = [0.1409 \ 0.1042 \ 0.4265 \ 0.3284]$$

$$A_2 = [0.3338 \ 0.1416 \ 0.5247]$$

$$A_3 = [0.0604 \ 0.2879 \ 0.4894 \ 0.1623]$$

$$A_4 = [0.2867 \ 0.1836 \ 0.0972 \ 0.4325]$$

$$A_5 = [0.2973 \ 0.1638 \ 0.5390]$$

3 系留式消防无人机灭火风险模糊综合评价

3.1 确立评价因素和相关的评价集

图 1 中某系留式消防无人机灭火效能风险指标体系的各项因素可作为模糊综合评价的因素集。本文对准则层各指标给定如下的评价集 V: {很强, 强, 一般, 弱, 很弱}, 对应的评分集为 {1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2}。

3.2 确立模糊关系矩阵

对每一个一级因素集确定一个从因素集 U_i 到评价集 V 的模糊关系矩阵 $R_i=(r_{ij})_{n \times 5}$ 表示从某个一级因素集的因素 i 属于评价集中的程度。即得到了 5 个模糊关系矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3 计算模糊综合评判分数

由各级权重因素和已得到的模糊关系矩阵,可以计算得到评判向量 $B_i=A_i \times R_i(i=1, 2, 3, 4, 5)$, 故可得:

$$B_1 = [0.1021 \ 0.2100 \ 0.2755 \ 0.3795 \ 0.0328]$$

$$B_2 = [0.1475 \ 0.3858 \ 0.2666 \ 0.2000 \ 0.0000]$$

$$B_3 = [0.0940 \ 0.2288 \ 0.2612 \ 0.3322 \ 0.0838]$$

$$B_4 = [0.2568 \ 0.3103 \ 0.2616 \ 0.1713 \ 0.0000]$$

$$B_5 = [0.1625 \ 0.2461 \ 0.3375 \ 0.2539 \ 0.0000]$$

可得一级评判矩阵为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1021 & 0.2100 & 0.2755 & 0.3795 & 0.0328 \\ 0.1475 & 0.3858 & 0.2666 & 0.2000 & 0.0000 \\ 0.0940 & 0.2288 & 0.2612 & 0.3322 & 0.0838 \\ 0.2568 & 0.3103 & 0.2616 & 0.1713 & 0.0000 \\ 0.1625 & 0.2461 & 0.3375 & 0.2539 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

由二级综合评判矩阵可得评价向量:

$$B_0 = A_0 \times R_0 = [0.1319 \ 0.2757 \ 0.2700 \ 0.2825 \ 0.0399]$$

根据系留式消防无人机灭火效能风险评价体系和评分集,某系留式消防无人机的最终得分为 $B_0 \times [1 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.4 \ 0.2]^T$, 最终综合得分为 0.6354。

进而计算某系留式消防无人机各项一级指标的得分情况,计算 $B_i \times [1 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.4 \ 0.2]^T$, 得到:

$$S_1=0.5938, S_2=0.6962, S_3=0.5834, S_4=0.7305, S_5=0.6634$$

通过以上得分可以清晰地看出该系留式消防无人机的

第四项指标“人员因素”影响相对较弱,但第一项指标“机体性能”和第三项指标“保障能力”灭火效能风险影响较大,要进行加强和完善。

4 结语

系留式消防无人机在高层建筑灭火救援方面有着较大的发展前景。论文通过确立系留式消防无人机灭火效能风险评价指标体系,结合层次分析法和模糊综合评价法构建其灭火效能风险评估模型,有助于了解系留式消防无人机目前存在的能力和不足,明确系留式消防无人机在高层建筑消防灭火中的实际应用价值,对消防无人机后续的研究和发展提供有力的理论支撑。

参考文献

- [1] 郭兰旺.高层建筑火灾扑救难点及火场供水对策分析[J].今日消防,2023,8(4):44-46.
- [2] 尹文强.基于改进层次分析法的无人机自主能力评价方法[J].飞行力学,2021,39(5):82-87.
- [3] 杨纶标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2001.
- [4] 唐波.基于改进的层次分析法的工程质量风险评估模型研究[J].山西建筑,2024,50(17):189-192.
- [5] 南开大学.一种锚地中船舶污染海洋环境风险指数的计算方法:CN202210206206.4[P].2023-05-16.
- [6] 晓杏,余达锦,刘亦晴.区域绿色创新系统成熟度指标体系的构建与评价[J].统计与决策,2019,35(21):45-49.