

基于改进层次分析法对航天发射安全风险的评估

游彦雯,王 森,贾 琦,赵斌宁,张 平,李俊峰

(太原卫星发射中心,山西 太原 030001)

摘 要: 针对航天发射安全风险评估涉及因素较多和等级划分的模糊性,提出了航天发射安全风险递阶层次的评估指标体系,并利用正态分布密度函数对层次分析法确定的权重指标进行修正,使风险评估结果更加科学合理。可以为航天发射确定安全风险管控重点、优化防控措施提供重要技术支撑。

关键词: 航天发射; 正态分布密度函数; 层次分析法; 安全风险评估

中图分类号: V 555⁺.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.02.009

引用格式: 游彦雯,王森,贾琦,等.基于改进层次分析法对航天发射安全风险的评估[J].上海航天(中英文), 2024,41(2):67-74.

Safety Risk Assessment of Spacecraft Launch Based on the Improved Analytic Hierarchy Process

YOU Yanwen, WANG Miao, JIA Qi, ZHAO Binning, ZHANG Ping, LI Junfeng

(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

Abstract: In response to the complex factors and hierarchical uncertainties involved in space launch safety risk assessment, an indicator framework for the hierarchical space launch safety risk assessment is presented. A normal distribution density function is used to refine the weighting of indicators determined by the analytic hierarchy process, so that the risk assessment results are more scientific and reasonable. The indicator framework helps to identify the key priorities for the safety risk management in space launch activities and to optimize the prevention and control measures.

Key words: space launch; normal distribution density function; analytic hierarchy process; safety risk assessment

0 引言

随着太空成为继陆地、海洋、空间外第4个生存发展空间,太空资源开发利用已成为新一轮国际战略竞争制高点。航天发射作为进出太空的重要手段,发射密度自2018年全球首次破百以来,一直呈上升趋势,2018—2023年分别达114^[1]、102^[2]、114^[3]、146^[4]、186^[5]、223次^[6]。我国也从第1个100次用37年,第2个100次用7年多,第3个100次用4年多,发展到第4个100次仅用2年9个月^[7],第5个100次仅用1年7个月。但由于航天发射涉及电气液核等多种危险源,系统复杂、技术密集,资源投入多、成败影响大,任何人的不安全行为、装备的不安全状态、环境的不安全条件都可能引发人员伤亡、装备损坏、环境破坏,

因此航天发射安全倍受瞩目。

纵观安全工程发展,安全风险评估已成为当今防范事故发生的重要手段,但当前航天发射安全风险的评估基本是经验型的定性分析,评估方法应用有一定局限性。如文献[8-9]采用风险矩阵及综合指数法,其风险发生的可能性、后果严重程度是靠经验定性确定,评估结果也无法体现评估指标间的关联性。文献[9-15]分别采用层次分析、模糊评价、贝叶斯网络推理、概率风险评估、事件序列图、故障树、证据理论等风险评估方法构建了有关航天发射安全风险评估模型,但输入对主观认识的依赖性都较强。

本文以某航天发射任务为例,采用层次分析法^[16]的基本步骤和方法^[17],通过分析航天发射任务涉及的危险源(即风险因素)^[18]构建了递阶层次的

收稿日期:2023-09-04; 修回日期:2024-02-01

作者简介:游彦雯(1966—),女,学士,高级工程师,主要研究方向为航天发射安全。

安全风险评估指标体系,并利用正态分布密度函数^[19]最大限度去除专家打分主观性影响,得到更加科学合理的影响航天发射安全的风险因素总排序。

1 构建递阶层次安全风险评估指标体系

一起事故的发生通常是 2 类危险源共同作用的结果,第 1 类危险源是伤亡事故发生的能量或毒害物质,是事故发生的前提,决定着事故后果严重程度。第 2 类危险源是导致约束限制能量或毒害物质措施失效或破坏的各种不安全因素,是第 1 类危险源造成事故的必要条件,决定事故发生的可能性^[20]。在正常情况下,第 1 类危险源受到约束或限制不会意外释放能量,只有在第 2 类危险源发生时才会导致第 1 类危险源能量的意外释放。

依据第 1 类危险源的定义可知,航天发射第 1 类危险源主要有电能、化学能、高压能、动能、势能、热能、震动能、放射辐射能、毒害物质、涉密信息等。且从国内外发生的航天事故可以看出,任何一点设计缺陷、一次指挥操作失误、一个元器件失效……,都可能使第 1 类危险源失控而酿成事故。因此,结合某航天发射测试发射流程中存在的第 1 类危险源,以及以往航天发射发生的事故、安全隐患等情况,辨识某航天发射参试人员(以下简称人员)、航天产品(以下简称产品)、发射场地面设施设备(以下简称地设)、原材料、文书资料(以下简称文书)、环境、组织管理(以下简称管理)等方面第 2 类危险源^[21-24],即构成的航天发射三级递阶层次安全风险评估指标体系,见表 1。

表 1 某航天发射安全风险评价指标体系

Tab.1 An indicator system for space launch safety risk assessment

目标层	子目标层	子目标风险因素	目标层	子目标层	子目标风险因素
航天发射 (U)	人员(U ₁)	能力水平现状(U ₁₁)	航天发射 (U)	原材料(U ₄)	元器件可靠性(U ₄₁)
		指挥准确性(U ₁₂)			器件选型符合性(U ₄₂)
		规定执行力(U ₁₃)			供电满足要求情况(U ₄₃)
		操作熟练程度(U ₁₄)			供气满足要求情况(U ₄₄)
		工作经验积累情况(U ₁₅)			液体推进剂满足要求情况(U ₄₅)
		责任心情况(U ₁₆)			仪器仪表计量情况(U ₄₆)
		心理生理状况(U ₁₇)			防护装备准备情况(U ₄₇)
		安全保密意识(U ₁₈)			
	产品(U ₂)	方案设计正确性(U ₂₁)		文书(U ₅)	配套齐全性(U ₅₁)
		功能全面性(U ₂₂)			指标要求正确性(U ₅₂)
		性能达标情况(U ₂₃)			表述准确性(U ₅₃)
		设计输出符合性(U ₂₄)			内容充分性(U ₅₄)
		软件编制正确性(U ₂₅)		环境(U ₆)	温度满足要求情况(U ₆₁)
		生产工艺符合性(U ₂₆)			湿度满足要求情况(U ₆₂)
		生产质量保障性(U ₂₇)			洁净度满足要求情况(U ₆₃)
		总体结构协调性(U ₂₈)			照度满足要求情况(U ₆₄)
		电气接口协调性(U ₂₉)			接地满足要求情况(U ₆₅)
		机械接口协调性(U ₂₁₀)			防雷满足要求情况(U ₆₆)
		软硬件匹配性(U ₂₁₁)			静电防护满足要求情况(U ₆₇)
		电磁兼容性(U ₂₁₂)			毒害物质管控满足要求情况(U ₆₈)
		抗振冲击噪声能力(U ₂₁₃)			道路满足要求情况(U ₆₉)
		标识符合性(U ₂₁₄)		管理(U ₇)	组织机构及职责设置情况(U ₇₁)
		多余物控制情况(U ₂₁₅)			定岗定位及教育培训情况(U ₇₂)
		防护措施实施情况(U ₂₁₆)			规章制度建设情况(U ₇₃)
		计算机病毒防护情况(U ₂₁₇)			策划安排合理性(U ₇₄)
		地面环境适应性(U ₂₁₈)			信息交流畅通性(U ₇₅)
		空间环境适应性(U ₂₁₉)			监督管控组织情况(U ₇₆)
		太空环境适应性(U ₂₂₀)			过程控制严格性(U ₇₇)
					状态更改控制情况(U ₇₈)

续表 1 某航天发射安全风险评价指标体系

Continued Tab.1 An indicator system for space launch safety risk assessment

目标层	子目标层	子目标风险因素	目标层	子目标层	子目标风险因素
航天发射 (U)	地设 (U_3)	功能性能满足产品情况(U_{31})	航天发射 (U)	管理(U_7)	警戒警卫安排情况(U_{79})
		与产品接口协调性(U_{32})			问题归零情况(U_{710})
		与产品电磁兼容性(U_{33})			社会因素掌控能力(U_{711})
		空间目标预警能力(U_{34})			应急准备情况(U_{712})
		检查维护全面性(U_{35})			应急响应和处置能力(U_{713})
		标识符合性(U_{36})			注 1:“子目标风险因素”即为“第 2 类危险源”。 注 2:航天发射任务不同,子目标风险因素也不同,在构建评估指标体系时,应结合任务和现状,适当增减评估指标。如:海上发射应增加“产品海况适应能力”,载人航天发射应增加“飞船的人-机-环保障能力”,产品有放射性材料应增加“核材料安全性”,固体运载火箭发射应删除“液体推进剂满足要求情况”,非雷电季节可删除“防雷满足要求情况”等。
		多余物控制情况(U_{37})			
		计算机病毒防护情况(U_{38})			
		地面环境适应性(U_{39})			

2 确定各层次安全风险因素影响权重

2.1 确定目标层安全风险因素权重

2.1.1 构建比较判断矩阵

递阶层次安全风险评估指标体系构建后,上、下层评估指标的隶属关系也明确,目标层对下一层因素($U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7$)有支配关系,利用给定的比例标度,见表 2,对同一层次评估指标每两者比较则构建成 n 阶比较判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

表 2 比例标度与意义

Tab.2 Proportion scale and meaning

标度 a_{ij}	定义与说明
1	因素 i 与因素 j 同样重要
3	因素 i 比因素 j 稍微重要
5	因素 i 比因素 j 明显重要
7	因素 i 比因素 j 特别重要
9	因素 i 比因素 j 极度重要
2, 4, 6, 8	表示需在上述 2 个标准之间折中时的标度
$1, 1/2, 1/3, \dots, 1/9$	因素 j 对因素 i 的重要性是因素 i 对因素 j 重要性的倒数

虽然同一层次评估指标每两者比较有明确的标度,使比较判断矩阵具有一定的系统性,但在实际判断过程中,由于人的主观性,传统层次分析法通过直接判断给出的标度值有较大的人为因素,即使取多位专家标度值的平均,也有一定的人为因素。因此,为确保标度值最大限度去除人为因素,

对多位专家给出的标度值采用正态分布密度函数进行修正,使安全风险评估结果更加科学合理。具体方法如下^[25]。

1) 选择 M 位专家打分,第 r 个专家给出的标度值为 $a_{ij}(r)$,则求出第 r 个专家打分 $a_{ij}(r)$ 与 $\bar{a}_{ij}$ 的偏差为

$$\Delta a_{ij}(r) = a_{ij}(r) - \bar{a}_{ij} \quad (1)$$

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^M a_{ij}(r)}{M}; i, j = 1, 2, \dots, n; r = 1, 2, \dots, M。$$

2) 由于专家打分带有一定主观性, $\Delta a_{ij}(r)$ 也各不相同,一般偏差较大的打分越不合理,反之,则相对合理。利用正态分布密度函数式(2)计算第 r 个专家打出的 $a_{ij}(r)$ 标度值的权重,可以有效降低偏差大专家打分权重、增加偏差小专家打分权重,从而去除专家打分的主观性影响。具体公式为

$$\lambda(r) = \frac{1}{M} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Delta a_{ij}(r))^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

$$\text{式中: } \lambda(r) \text{ 为第 } r \text{ 个专家权重; } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^M \Delta a_{ij}(r)^2}{M}}; r = 1, 2, \dots, M。$$

3) 对专家打分的权重 $\lambda(r)$ 进行归一化处理,则:

$$\lambda^*(r) = \frac{\lambda(r)}{\sum_{r=1}^M \lambda(r)} \quad (3)$$

对目标层 U 的子目标层因素($U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7$), 请 10 位专家对某航天发射任务的每两者比较的标度打分并用式(2)、式(3)进行修正, 结果见表 3。

表 3 专家标度值打分情况及标度值修正结果表
Tab.3 Scoring and correction results of expert scale values

标度 a_{ij}	专家	标度值 打分	标度值 平均值	打分 权重	修正 标度值	标度 a_{ij}	专家	标度值 打分	标度值 平均值	打分 权重	修正后 标度值
a_{12}	专家 1	2	2.1	0.144	2.002	a_{13}	专家 1	3	3.4	0.135	2.813
	专家 2	3		0.092			专家 2	2		0.107	
	专家 3	2		0.144			专家 3	8		0.009	
	专家 4	2		0.144			专家 4	6		0.057	
	专家 5	3		0.092			专家 5	2		0.107	
	专家 6	1		0.073			专家 6	2		0.107	
	专家 7	1		0.073			专家 7	2		0.107	
	专家 8	2		0.144			专家 8	4		0.131	
	专家 9	1		0.073			专家 9	2		0.107	
	专家 10	4		0.019			专家 10	3		0.135	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_{24}	专家 1	4	3.4	0.130	3.688	a_{25}	专家 1	3	3.4	0.116	3.305
	专家 2	1		0.030			专家 2	3		0.116	
	专家 3	5		0.072			专家 3	3		0.116	
	专家 4	5		0.072			专家 4	4		0.076	
	专家 5	4		0.130			专家 5	4		0.076	
	专家 6	4		0.130			专家 6	3		0.116	
	专家 7	3		0.138			专家 7	4		0.076	
	专家 8	3		0.138			专家 8	3		0.116	
	专家 9	1		0.030			专家 9	3		0.116	
	专家 10	4		0.130			专家 10	4		0.076	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

由表 3 可知,修正后 a_{ij} 标度值均有一定的变化,如 a_{13} 、 a_{24} 、 a_{25} 标度值直接取专家打分平均值都为 3.4,但经式(2)、式(3)修正后有很大变化,修正后 a_{13} 标度值减小为 2.813,是由于 a_{13} 打分中有较 $\overline{a_{13}}$ 偏差较大的高分, a_{24} 标度值增大为 3.688,是由于 a_{24} 打分中有较 $\overline{a_{24}}$ 偏差较大的低分,而 a_{25} 标度值变化不大,是由于 a_{25} 打分与 $\overline{a_{25}}$ 的偏差都很小。可见正态分布密度函数修正后的专家打分结果,可去除打分过程的人为主观性影响,使安全风险评估结果更加科学合理。

根据以上 10 位专家打分结果,某航天发射任务目标层因素采用取平均值法得到的比较判断矩阵见表 4,通过正态分布密度函数修正后的比较判断矩阵见表 5。

表 4 某航天发射任务目标层次因素取专家打分平均值的判断矩阵

Tab.4 Judgment matrix of the average values of expert scoring for the target level factors of a space launch mission

判断矩阵 A_1	人员 U_1	产品 U_2	地设 U_3	原材料 U_4	文书 U_5	环境 U_6	组织 U_7
人员 U_1	1.000	2.100	3.400	4.100	4.900	3.000	3.200
产品 U_2	0.476	1.000	2.300	3.400	3.400	2.600	2.300
地设 U_3	0.294	0.435	1.000	2.300	3.100	1.500	1.300
原材料 U_4	0.244	0.294	0.435	1.000	2.200	1.800	0.620
文书 U_5	0.204	0.294	0.323	0.455	1.000	0.975	1.075
环境 U_6	0.333	0.385	0.667	0.556	1.026	1.000	1.050
管理 U_7	0.313	0.435	0.769	1.623	0.930	0.952	1.000

表 5 某航天发射任务目标层次因素专家打分正态分布密度函数权重修正后的判断矩阵

Tab.5 Judgment matrix of expert scoring for the target hierarchical factors in a space launch mission after the weight correction by the normal distribution density function

判断矩阵 A_1	人员 U_1	产品 U_2	地设 U_3	原材料 U_4	文书 U_5	环境 U_6	组织 U_7
人员 U_1	1	2.002	2.813	4.156	5.114	3.000	3.024
产品 U_2	0.499	1.000	2.154	3.688	3.305	2.042	2.030
地设 U_3	0.355	0.464	1.000	2.105	2.990	1.231	1.142
原材料 U_4	0.241	0.271	0.475	1.000	1.972	1.744	0.598
文书 U_5	0.196	0.303	0.334	0.507	1.000	0.835	0.990
环境 U_6	0.333	0.490	0.812	0.573	1.197	1.000	0.941
管理 U_7	0.331	0.493	0.876	1.671	1.010	1.062	1.000

2.1.2 计算评估指标权重分配

根据比较判断矩阵,求其最大特征根 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量 W' 。求解方程为

$$AW' = \lambda_{\max} W' \quad (4)$$

所求的特征向量 W' 即为各评估因素的重要排序, W' 经归一化处理即得到权重向量 W , W 即是下一层各评估因素对上一层所隶属评估因素的重要程度权重分配。

由式(4)得目标层各评估因素权重:

$$W_1 = (0.325, 0.215, 0.128, 0.085, 0.062, 0.089, 0.100)$$

2.1.3 判断矩阵一致性检验

得到的权重分配是否合理,需进行一致性检验。检验公式为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

式中: CR 为随机一致性比率; CI 为一般一致性指标, $CI = \frac{\lambda_{\max} - s}{s - 1}$ (s 为判断矩阵阶数); RI 为平均随机一致性指标,1~15 阶判断矩阵的 RI 值参见表 6。

表 6 1~15 阶正互反矩阵平均随机一致性指标

Tab.6 Average random consistency indicators of the 1~15 order positive reciprocal matrices

阶数 s	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41
阶数 s	9	10	11	12	13	14	15	
RI	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

注:由于未查到当 $s > 15$ 时的正互反矩阵计算 1 000 次得到的平均随机一致性指标,考虑到随机一致性指标 RI 随判断矩阵阶数 s 的增大而增大,故 $s > 15$ 时,所有随机一致性指标暂取判断矩阵阶数为 15 时的指标值(1.59)。

当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵具有可以接受的一致性,即权重分配合理;当 $CR > 0.10$ 时,应对判断矩阵进行适当修正,重新分配权重,使其满足 $CR < 0.10$ 。经计算求得目标层判断矩阵 $\lambda_{\max} = 7.222$ 、 $CI = 0.037$,取 7 阶判断矩阵 $RI = 1.36$,由式(5)得到 $CR = 0.027 < 0.10$,证明修正后判断矩阵可以接受,得到的子目标层权重也可接受。

2.2 确定子目标层安全风险因素权重

同 2.1 节中目标层安全风险因素权重确定方法,子目标层安全风险因素的权重计算结果如下:

$$W_{21} = (0.369, 0.186, 0.071, 0.117, 0.117, 0.071, 0.046, 0.024)$$

$$W_{22} = (0.145, 0.103, 0.092, 0.026, 0.135, 0.070, 0.044, 0.026, 0.026, 0.044, 0.044, 0.044, 0.044, 0.026, 0.018, 0.010, 0.032, 0.022, 0.047, 0.003)$$

$$W_{23} = (0.206, 0.128, 0.232, 0.030, 0.054, 0.072,$$

$$0.142, 0.034, 0.102)$$

$$W_{24} = (0.288, 0.153, 0.235, 0.093, 0.060, 0.158, 0.012)$$

$$W_{25} = (0.227, 0.424, 0.122, 0.227)$$

$$W_{26} = (0.313, 0.142, 0.116, 0.096, 0.082, 0.075, 0.071, 0.043, 0.062)$$

$$W_{27} = (0.156, 0.070, 0.054, 0.118, 0.080, 0.146, 0.054, 0.054, 0.012, 0.012, 0.031, 0.107, 0.107)$$

3 层次总排序

利用层次权重排序可以得出本层次安全风险排序结果,进一步合成权重则得到上一层的总排序。合成权重的计算应自上而下,将单一层次下的相对权重进行合成,直至最低层。

假设已求出第 $k-1$ 层上 n 个因素相对于目标的权重向量为

$$\mathbf{w}^{(k-1)} = (w_1^{(k-1)}, w_2^{(k-1)}, \dots, w_n^{(k-1)})^T \quad (6)$$

k 层上一个因素对第 $k-1$ 层上各个因素的相对权重向量为

$$\mathbf{p}^{(k)} = (p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)})^T \quad (7)$$

因此,求得 k 层上因素对目标层的合成权重向

量 $\mathbf{w}^{(k)}$ 为

$$\mathbf{w}^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})^T = \mathbf{p}^{(k)} \mathbf{w}^{(k-1)} \quad (8)$$

由式(8)可得某航天发射任务风险因素对航天发射任务安全影响的总排序结果,见表 7,各风险因素对任务的影响一目了然。

表 7 某航天发射任务各层次风险因素对安全工作的影响权重及总排序

Tab.7 Influence weight and total ranking of the risk factors at all levels on the safety work of a space launch mission

风险因素		人员 U_1	产品 U_2	地设 U_3	原材料 U_4	文书 U_5	环境 U_6	组织 U_7	$\mathbf{W}^{(3)}$	总排序
		0.325	0.215	0.128	0.085	0.062	0.086	0.100		
人员 U_1	能力水平现状(U_{11})	0.369	—	—	—	—	—	—	0.120	1
	指挥准确性(U_{12})	0.186	—	—	—	—	—	—	0.060	2
	规定执行力(U_{13})	0.071	—	—	—	—	—	—	0.023	12
	操作熟练程度(U_{14})	0.117	—	—	—	—	—	—	0.038	3
	工作经验积累情况(U_{15})	0.117	—	—	—	—	—	—	0.038	3
	责任心情况(U_{16})	0.071	—	—	—	—	—	—	0.023	12
	心理生理状况(U_{17})	0.046	—	—	—	—	—	—	0.015	20
	安全保密意识(U_{18})	0.024	—	—	—	—	—	—	0.008	39
产品 U_2	方案设计正确性(U_{21})	—	0.145	—	—	—	—	—	0.031	5
	功能全面性(U_{22})	—	0.103	—	—	—	—	—	0.022	14
	性能达标情况(U_{23})	—	0.092	—	—	—	—	—	0.020	15
	设计输出符合性(U_{24})	—	0.026	—	—	—	—	—	0.006	48
	软件编制正确性(U_{25})	—	0.135	—	—	—	—	—	0.029	7
	生产工艺符合性(U_{26})	—	0.070	—	—	—	—	—	0.015	20
	生产质量保障性(U_{27})	—	0.044	—	—	—	—	—	0.009	34
	总体结构协调性(U_{28})	—	0.026	—	—	—	—	—	0.006	48
	电气接口协调性(U_{29})	—	0.026	—	—	—	—	—	0.006	48
	机械接口协调性(U_{210})	—	0.044	—	—	—	—	—	0.009	34
	软硬件匹配性(U_{211})	—	0.044	—	—	—	—	—	0.009	34
	电磁兼容性(U_{212})	—	0.044	—	—	—	—	—	0.004	60
	抗振动冲击噪声能力(U_{213})	—	0.044	—	—	—	—	—	0.009	34
	标识符合性(U_{214})	—	0.026	—	—	—	—	—	0.006	48
	多余物控制情况(U_{215})	—	0.018	—	—	—	—	—	0.004	60
	防护措施实施情况(U_{216})	—	0.010	—	—	—	—	—	0.002	66
	计算机病毒防护情况(U_{217})	—	0.032	—	—	—	—	—	0.007	44
	地面环境适应性(U_{218})	—	0.022	—	—	—	—	—	0.005	54
	空间环境适应性(U_{219})	—	0.047	—	—	—	—	—	0.010	32
	太空环境适应性(U_{220})	—	0.003	—	—	—	—	—	0.001	67
地设 U_3	功能性能满足产品情况(U_{31})	—	—	0.206	—	—	—	—	0.026	9
	与产品接口协调性(U_{32})	—	—	0.128	—	—	—	—	0.016	18
	电磁兼容性(U_{33})	—	—	0.232	—	—	—	—	0.030	6
	空间目标预警能力(U_{34})	—	—	0.030	—	—	—	—	0.004	60
	检查维护全面性(U_{35})	—	—	0.054	—	—	—	—	0.007	44
	标识符合性(U_{36})	—	—	0.072	—	—	—	—	0.009	34
	多余物控制情况(U_{37})	—	—	0.142	—	—	—	—	0.018	17
	计算机病毒防护情况(U_{38})	—	—	0.034	—	—	—	—	0.004	60
	地面环境适应性(U_{39})	—	—	0.102	—	—	—	—	0.013	25

续表 7 某航天发射任务各层次风险因素对安全工作的影响权重及总排序

Continued Tab.7 Influence weight and total ranking of the risk factors at all levels on the safety work of a space launch mission

风险因素		人员 U_1	产品 U_2	地设 U_3	原材料 U_4	文书 U_5	环境 U_6	组织 U_7	$W^{(3)}$	总排序
		0.325	0.215	0.128	0.085	0.062	0.086	0.100		
原材料 U_4	元器件可靠性(U_{41})	—	—	—	0.288	—	—	—	0.024	11
	器件选型符合性(U_{42})	—	—	—	0.153	—	—	—	0.013	25
	供电满足要求情况(U_{43})	—	—	—	0.235	—	—	—	0.020	15
	供气满足要求情况(U_{44})	—	—	—	0.093	—	—	—	0.008	40
	液体推进剂满足要求情况(U_{45})	—	—	—	0.060	—	—	—	0.005	54
	仪器仪表计量情况(U_{46})	—	—	—	0.158	—	—	—	0.013	25
	防护装备准备情况(U_{47})	—	—	—	0.012	—	—	—	0.001	67
文书 U_5	配套齐全性(U_{51})	—	—	—	—	0.227	—	—	0.014	23
	指标要求正确性(U_{52})	—	—	—	—	0.424	—	—	0.026	9
	表述准确性(U_{53})	—	—	—	—	0.122	—	—	0.008	40
	内容充分性(U_{54})	—	—	—	—	0.227	—	—	0.014	23
环境 U_6	温度满足要求情况(U_{61})	—	—	—	—	—	0.313	—	0.027	8
	湿度满足要求情况(U_{62})	—	—	—	—	—	0.142	—	0.012	28
	洁净度满足要求情况(U_{63})	—	—	—	—	—	0.116	—	0.010	32
	照度满足要求情况(U_{64})	—	—	—	—	—	0.096	—	0.008	40
	接地满足要求情况(U_{65})	—	—	—	—	—	0.082	—	0.007	44
	防雷满足要求情况(U_{66})	—	—	—	—	—	0.075	—	0.006	48
	静电防护满足要求情况(U_{67})	—	—	—	—	—	0.071	—	0.006	48
	毒害物质管控满足要求情况(U_{68})	—	—	—	—	—	0.043	—	0.004	60
	道路满足要求情况(U_{69})	—	—	—	—	—	0.062	—	0.005	54
管理 U_7	组织机构及职责设置情况(U_{71})	—	—	—	—	—	—	0.156	0.016	18
	定岗定位及教育培训情况(U_{72})	—	—	—	—	—	—	0.070	0.007	44
	规章制度建设情况(U_{73})	—	—	—	—	—	—	0.054	0.005	54
	策划安排合理性(U_{74})	—	—	—	—	—	—	0.118	0.012	28
	信息交流畅通性(U_{75})	—	—	—	—	—	—	0.080	0.008	40
	监督管控组织情况(U_{76})	—	—	—	—	—	—	0.146	0.015	20
	过程控制严格性(U_{77})	—	—	—	—	—	—	0.054	0.005	54
	状态更改控制情况(U_{78})	—	—	—	—	—	—	0.054	0.005	54
	警戒警卫安排情况(U_{79})	—	—	—	—	—	—	0.012	0.001	67
	问题归零情况(U_{710})	—	—	—	—	—	—	0.012	0.001	67
	社会因素掌控能力(U_{711})	—	—	—	—	—	—	0.031	0.003	65
	应急准备情况(U_{712})	—	—	—	—	—	—	0.107	0.011	30
	应急响应和处置能力(U_{713})	—	—	—	—	—	—	0.107	0.011	30

4 结束语

科学合理的安全风险评估是确保航天发射任务圆满成功的关键环节,通过定性与定量分析相结合、决策者与数学建模计算共同参与的改进层次分析法,可以得到更加科学合理、系统精准的航天发射任务诸多安全风险因素排序,确保风险防控措施策划实施更加有的放矢。

本文改进层次分析法还可以用于其他多准则、多目标复杂问题的决策分析,如航天发射任务质量分析、科研项目方案比较、人员能力素质评测等。

参考文献

- [1] 北京空间科技信息研究所空间瞭望智库.中国航天科技活动蓝皮书(2018年)[R].北京:中国航天科技集团有限公司,2019.

- [2] 北京空间科技信息研究所空间瞭望智库. 中国航天科技活动蓝皮书(2019年)[R]. 北京:中国航天科技集团有限公司, 2020.
- [3] 北京空间科技信息研究所空间瞭望智库. 中国航天科技活动蓝皮书(2020年)[R]. 北京:中国航天科技集团有限公司, 2021.
- [4] 北京空间科技信息研究所空间瞭望智库. 中国航天科技活动蓝皮书(2021年)[R]. 北京:中国航天科技集团有限公司, 2022.
- [5] 北京空间科技信息研究所空间瞭望智库. 中国航天科技活动蓝皮书(2022年)[R]. 北京:中国航天科技集团有限公司, 2023.
- [6] 胡喆. 2023年航天科技集团计划安排60余次宇航发射任务发射200余个航天器[EB/OL]. (2023-01-18) [2023-09-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/18/content_5737844.htm.
- [7] 余建斌. 高密度发射同时保持高成功率2021年我国航天发射次数居世界第一[EB/OL]. (2021-01-19) [2023-09-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/19/content_5669204.htm.
- [8] 施镇顺, 朱亚雄, 孙成杰, 等. 航天发射任务风险评估研究[J]. 航天标准化, 2020(3): 7-14.
- [9] 熊杰, 张善从. 基于AHP和风险矩阵的航天研制项目风险评估[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(11): 124-126.
- [10] 游彦雯, 郭希玲, 韩潇. 基于模糊综合评价的航天发射场安全风险研究[J]. 导弹试验技术, 2012(4): 36-39.
- [11] 董学军, 杜建洲. 基于证据合成与贝叶斯网络推理的航天器发射风险评估模型[J]. 系统工程概论与实践, 2019, 39(8): 2170-2178.
- [12] 赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估(PRA)方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2000(6): 91-97.
- [13] 吴启明. 载人航天系统安全性风险评估的ESD方法研究及软件实现[D]. 长沙:国防科技大学, 2005.
- [14] 黄彩妹, 贾瑛, 樊秉安. 液体推进剂的环境风险分析和管理对策[J]. 上海航天, 2003, 20(5): 54-56.
- [15] 周旋. 基于证据理论的风险评估方法研究—以航天项目为例[J]. 财政监督, 2013(5): 68-70.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风险管理风险评估技术: GB/T 27921—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [17] 佟瑞鹏, 李桂君, 于春雨. 常用安全评价方法及其应用[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2011.
- [18] 张曾莲. 风险评估方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [19] A. JOHNSON RICHARD. 概率论与数理统计(英文版)[M]. 9版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [20] 罗云. 风险分析与安全评价[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [21] 范蕾懿. 质量与安全质量风险管理研究[J]. 上海航天, 2014, 31(增刊1): 35-37, 59.
- [22] 裴慧峰, 岳昊瞳, 李晓龙. 航天型号管理中的项目风险管理实践[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(5): 164-168.
- [23] 崔赢午, 袁振, 孟庆丰, 等. 空间站任务应急发射流程技术安全管理的设计与实现[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(1): 143-147.
- [24] 李利群, 李成, 韩秀利, 等. 运载火箭海上发射运用样式研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2023(5): 60-66.
- [25] 贺倩筠, 贺子洋, 张文宇, 等. 基于改进模糊层次分析法的智能电表运行质量评估策略[J/OL]. 电测与仪表, 1-11 [2024-02-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20220424.1943.002.html>.