

机场运行安全风险评估方法

——以运城盐湖国际机场为例

荆增强

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要: 机场运行安全是民航安全的基石。通过构建机场运行风险评估体系,对机场运行安全进行风险评估,提前发现并排除运行风险因素和安全隐患。首先,结合人-机-环-管的理论,建立机场运行安全评估体系;然后,使用层次分析法和熵值法两种方法,分别计算各指标的权重,对两种方法得出的数据进行相互修正,进行加权综合计算,得出各级指标的综合权重;最后,对运城盐湖国际机场运行进行风险评估测试,测试结果正确合理。

关键词: 机场; 风险评估; 层次分析法; 熵值法

中图分类号: X951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)11-0105-06

机场作为重要的交通枢纽,不仅承担着连接世界各地的重要使命,还关系到国家经济命脉和社会的稳定发展。作为航空运输的重要基础设施,机场的运行安全至关重要。回顾民航发展史,因为机场安全管理的不到位,导致许多空难的发生。对航班不同飞行阶段发生的空难进行统计分析发现,飞机的起飞和降落阶段发生的事故次数达到了事故总次数的一半以上。在起降阶段发生的飞行事故大都与机场的运行环境有关。因此,机场运行风险评估工作标准及要求较高,相应的配套设施及员工均需按在安全管理规章制度下配备完善的风险管理体系^[1]。

综合分析现有的研究成果,国内外学者主要关注点在安全管理、风险评估、风险控制等方面,从人-机-环-管相互作用、影响的角度,对民航安全管理存在的问题进行分析,识别导致安全事故的风险因子,优化管理方式或设施设备,降低事故的发生率。加拿大民航安全组织(ALPA)认为安全管理是民航业持续发展的重要基础,能有效提升航空飞行安全性与经济效益水平^[2]。De Vivo等^[3]利用风险评估通用模型来测试意大利机场在极端降水条件下的气候状况,并对该状态下的机场进行风险评估;Zu等^[4]使用风险评估模型来对机场管制员的绩效进行评估工作。国际民航组织(ICAO)通过颁布《机场服务质量标准和指南》来制定全球通用的机场安全运行的国际标准和规章,促进保障机场运行安全措

施的推广^[5]。周雪芳等^[6]利用风险评估指标法构建机场场面关键节点风险评估模型,探究时间和空间对场面冲突热点的影响;张文平和黄晋^[7]使用了层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-模糊综合评价法对开辟支线航班的风险进行系统评估^[7]。以上分析方法都能对风险进行比较好的评估,但都有一定的局限性,如评估标准和方法单一、决策判断比较主观、计算较为复杂、无法较好地将客观数据与决策者的经验相结合等。由于机场运行影响因素复杂,如何找到一种分析方法较好地综合评估指标的主观经验与客观数据,并量化权重有一定意义^[8]。董嘉成和沈大娟^[9]指出,单一评估方法具有一定的主观性,为了使权重值更加客观,采用不同方法修正权重值。本文通过文献分析法研究国内外学者的研究成果和文献资料,结合机场风险评估的研究现状,与机场运行专家沟通访谈,获悉影响机场安全运行的风险因素,使用层次分析法构建机场运行风险评估体系,并使用层次分析法和熵值法分别计算风险指标的权重,两种方法相互补充和修正,计算出两者的综合权重,解决了评估方法单一的问题,提高了评估结果的准确性和合理性;最后,对盐湖国际机场运行安全进行了风险评估测试和验证,并提出了机场运行问题和改进措施,评估方法和结果合理,在中小型机场有推广和实用的价值。

收稿日期: 2024-12-13

作者简介: 荆增强(1977—),男,山东平度人,硕士,讲师,研究方向为航空安全管理、交通运输管理。

1 机场运行风险评估理论和方法

风险评估是指在对重大决策、改革、项目或者与公共利益相关的重大事项实施前,利用一系列方法,对潜在的风险因素开展系统全面、科学有效的调查与分析,并制定相应的防范措施和应对方案^[10]。对机场的运行安全进行评价,要强调过程管理,要看有没有一个完整的体系,保证每一个方面都不要有重大风险隐患^[11]。杨昌其等^[12]结合突变理论与模糊物元模型,从“人-机-环-管”4个方面进行了指标构建,将人、机械、环境和管理之间从定性的分析转变为科学合理的定量分析,使其有机地结合起来,更好地融合在一起,让系统更加稳定。

风险评估的流程包含风险调查、风险识别、风险评价以及风险应对措施。通过对专家访谈和问卷调查的方式,进行风险调查和风险识别,并建立起风险评估指标体系,如图 1 所示。

根据风险评估指标体系,建立数学模型,对指标权重进行计算,使用层次分析法(AHP)和熵值法两种方法,分别确定各级指标的权重,再对两种方法算出的各级指标的权重加权平均,算出每个指标的综合风险权重。

根据综合风险权重和专家建议,确定每个风险等级的分数段,构建风险等级表,对指定机场进行风险评估,得出被评估机场所处的风险等级,并加以分析,给出应对措施,从而建立起完整的机场运行安全风险评估体系。

2 风险评估方法的计算与应用测试

2.1 基于 AHP 确定指标权重

层次分析法(AHP)是一种广泛应用于决策分析的数学方法,它通过线性代数中的矩阵特征值理论来确定不同决策指标的权重。AHP 方法将决策问题分解为不同的层次,包括准则层和方案层,允许决策者在每个层级中结合定性分析和定量分析,以形成全面的决策框架^[13]。对指标采用 1-5 分标度法确定相对重要程度;通过发放网络问卷的方式,收集若干名专家对准则层和评价层的指标评分,得到 AHP 判断矩阵数据,见表 1,表 1 中的 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_{18}$,分别对应图 1 中准则层和评价层中的各项风险指标。

计算表 1 各级指标权重,对准则层 $A_1 \sim A_4$ 进行权重计算和一致性检验。

(1)使用式(1)求得特征向量 w_i 。

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: i 为行数; j 为列数; n 为总数; a_{ij} 为 i 行 j 列的评分。

得 $w_1 = 0.639, w_2 = 0.537, w_3 = 2.213, w_4 = 1.136$ 。

(2)使用式(2)进行归一化处理,求出权重系数 \bar{w}_i 。 $\bar{w}_1 = 0.135, \bar{w}_2 = 0.114, \bar{w}_3 = 0.470, \bar{w}_4 = 0.280$ 。

$$\bar{w}_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

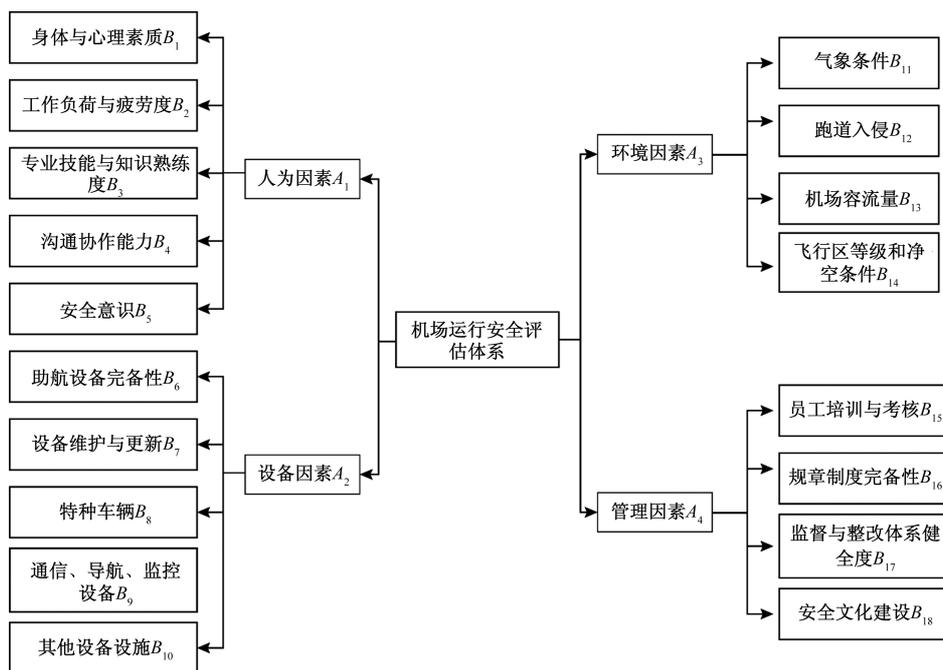


图 1 机场运行风险指标

表 1 AHP 判断矩阵

指标	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅	B ₁₆	B ₁₇	B ₁₈	
A ₁	1	2	1/4	1/3																			
A ₂	1/2	1	1/3	1/2																			
A ₃	4	3	1	2																			
A ₄	3	2	1/2	1																			
B ₁					1	1	1/2	1/3	1/3														
B ₂					1	1	1/2	1/2	1														
B ₃					2	2	1	1/3	1/2														
B ₄					3	2	3	1	1/2														
B ₅					3	1	2	2	1														
B ₆										1	1/2	3	1/2	1									
B ₇										2	1	2	1/3	1									
B ₈										1/3	1/2	1	1/2	2									
B ₉										2	3	2	1	3									
B ₁₀										1	1	1/2	1/3	1									
B ₁₁															1	2	3	3					
B ₁₂															1/2	1	2	2					
B ₁₃															1/3	1/2	1	1					
B ₁₄															1/3	1/2	1	1					
B ₁₅																			1	1	2	2	
B ₁₆																			1	1	1	3	
B ₁₇																			1/2	1	1	2	
B ₁₈																			1/2	1/3	1/2	1	

(3)利用式(3)求出各行数据的最大特征根 λ_{\max} 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

得 $\lambda_{\max} = 4.153$ 。

(4)利用式(4)求出一致性指标 CI。

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (4)$$

$n=4$ 时,一致性指标 $CI = 0.051$ 。

(5)利用式(5)求出一致性比率 CR。

$$CR = CI/RI \quad (5)$$

得 $CR = 0.051/0.89 = 0.057$ 。如果 $CR < 0.1$,那么判断矩阵一致性合理。

依照上述方法,对表 1 中评价层的 $B_1 \sim B_{18}$ 指标分别进行计算,得出各指标的组合权重,见表 2 的 AHP 组合权重一列。

2.2 基于熵值法确定指标权重

熵值法是一种可以避免主观因素的影响,更好地突出各指标数据差异性的赋权方法。

(1)从收集到的若干份问卷中,随机抽取 6 份专家打分表,统计出熵值法的专家评分表,见表 3。

(2)以准则层为例,对专家打分数据进行正向化处理,再按照式(6)对数据进行非负平移。

$$x'_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min x'_{ij}}{\max x'_{ij} - \min x'_{ij}} + 0.0001 \quad (6)$$

式中: i 为指标序号; j 为专家序号; x'_{ij} 为 j 专家给 i 指标的打分。

表 2 指标综合权重

准则层	评价层	AHP 组合权重	熵值法组合权重	综合权重
人为因素 A ₁	身体与心理素质 B ₁	0.014 0	0.031	0.006 59
	工作负荷与疲劳度 B ₂	0.018 9	0.032	0.009 11
	专业技能与知识熟练度 B ₃	0.023 1	0.016	0.005 70
	沟通协作能力 B ₄	0.038 7	0.091	0.053 39
	安全意识 B ₅	0.041 0	0.030	0.018 85
设备因素 A ₂	助航设备完备性 B ₆	0.019 8	0.094	0.054 18
	设备维护与更新 B ₇	0.022 2	0.011	0.007 47
	特种车辆 B ₈	0.014 6	0.069	0.029 31
	通信、导航、监视设备 B ₉	0.042 9	0.032	0.039 94
	其他设备设施 B ₁₀	0.014 6	0.070	0.029 80
环境因素 A ₃	气象条件 B ₁₁	0.214 0	0.022	0.134 41
	跑道入侵 B ₁₂	0.123 7	0.035	0.123 48
	机场容量 B ₁₃	0.066 3	0.091	0.171 03
	飞行区等级和净空条件 B ₁₄	0.066 3	0.069	0.130 13
管理因素 A ₄	员工培训与考核 B ₁₅	0.092 6	0.026	0.095 55
	规章制度完备性 B ₁₆	0.086 1	0.010	0.033 80
	监督与整改体系健全度 B ₁₇	0.065 4	0.014	0.035 94
	安全文化建设 B ₁₈	0.035 2	0.015	0.021 32

(3)按照式(7)对数据进行归一化处理。

$$p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \quad (7)$$

(4)按照式(8)得到各指标的信息熵 e_j 。

$$e_j = - \left(\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \right) / \ln n \quad (8)$$

(5)按照式(9)计算各层指标的权重系数 ω' 。

$$\omega'_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \quad (9)$$

表3 熵值法专家评分表

影响因素	专家打分分值					
	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	专家6
人员因素 A_1	3	4	4	3	4	4
设备因素 A_2	3	2	2	3	3	3
环境因素 A_3	4	3	5	3	4	4
管理因素 A_4	3	4	3	3	5	3
身体与心理素质 B_1	2	3	2	2	2	3
工作负荷与疲劳度 B_2	3	2	2	3	2	3
专业技能与知识熟练度 B_3	4	3	4	4	3	3
沟通协作能力 B_4	3	2	3	3	1	2
安全意识 B_5	2	3	3	4	3	3
助航设备完备性 B_6	1	2	2	1	1	1
设备维护与更新 B_7	2	1	3	2	2	1
特种车辆 B_8	3	2	2	1	2	2
通信、导航、监视设备 B_9	4	3	3	5	4	3
其它设备设施 B_{10}	2	1	1	2	2	2
气象条件 B_{11}	4	5	4	5	3	4
跑道入侵 B_{12}	3	5	3	4	3	3
机场容量 B_{13}	1	3	2	3	3	2
飞行区等级和净空条件 B_{14}	2	2	3	2	2	1
员工培训与考核 B_{15}	4	4	3	4	3	5
规章制度完备性 B_{16}	3	3	3	4	3	3
监督与整改体系健全度 B_{17}	3	4	4	3	4	4
安全文化建设 B_{18}	1	2	2	1	1	3

计算出准则层各层指标的权重系数 $w'_j = \{0.135, 0.260, 0.253, 0.352\}$ 。

按照上述计算方法,对评价层的专家打分数据进行计算,得到评价层的指标权重,见表2中熵值法权重一列。

2.3 计算 AHP-熵值法综合权重

根据式(10)计算综合权重。

$$c_i = \frac{a_i b_j}{\sum_{i=1, j=1}^{18} a_i b_j} \quad (10)$$

式中: c 为综合权重; a 为AHP权重; b 为熵值法权重。

通过计算,得出各指标的综合权重,见表2中综合权重一列。

对表2的结果进行分析比较,发现AHP组合权重和熵值法组合权重比较吻合,但是个别数据不一致。分析原因,是不同计算方法和误差造成的,而通过计算两者的综合权重,相互修正,可以有效消除这种误差,提高数据的准确性。

2.4 确定风险等级

根据专家建议,按照百分制把机场运行风险分成5个等级,见表4。根据专家对所评价机场的评分和表2各指标的综合权重,计算出所评价机场的风险等级,并对各指标因素加以分析,给出应对措施,从而建立起完整的机场运行安全风险评估体系。

表4 风险等级

分值	风险等级	专家评分标准	应对措施
0~20	非常严重	事故可能性高	根据机场相应级别的应急预案流程做好本职工作,及时上报给机场主管领导和有关部门,会商导致风险的原因,以便于制定恰当的应对措施
21~40	较为严重	事故可能性一般	根据机场相应级别的应急预案流程,提高各部分的重视程度,上报值班领导和有关部门,会商导致风险的原因,等待进一步的指令
41~60	一般	事故偶尔发生	由值班负责人加强监控,召集各个部门分析风险原因,制定应对措施
61~80	良好	事故可能性低	检查存在的潜在危险源,提高重视,保障机场安全运行
81~100	优秀	事故几乎不发生	做好日常工作,认真履行职责

2.5 应用测试

以运城盐湖国际机场为例,对上述评估方法进行应用测试和可行性检验。运城盐湖国际机场位于山西省运城市,属于国际支线机场,现拥有2个航站楼,面积共5.5万 m^2 。截至2024年1月,运城盐湖国际机场飞行区等级为4D,消防救援等级和应急救援等级均为7.0级,可使用最大机型为波音B767-300;跑道编号为08/26,长3200m、宽45m,26号跑道有仪表着陆系统和无方向信标(non-direction beacon, NDB)机,为双向I类精密进近跑道;有两条180m长的垂直联络道;民航站坪设18个C类机位和2个D类机位。机场图如图2所示。

盐湖机场现已开通北京、长沙、上海、宁波等35个主要城市的航线,引入了国航、东航、南航、厦航等7家航空公司,2023年旅客吞吐量219万人次,在全国259个民用运输机场排名第70位,是山西省第二大机场。2024年8月,机场新跑道通过验收,飞行区等级即将升级为4E级。2024年4月,国际航站楼正式投入运营,如图3所示,2024年4月28日,开通直飞泰国曼谷航线,2024年11月12日,开通直飞香港航线,2024年12月12日,开通直飞马来西亚吉隆坡航线,后续计划开通日本等其他国际航线。

运城盐湖国际机场在近年来发展非常迅速,开通和保障国际航班作为机场的一项重要业务创新,所以对这项工作特别重视,机场运行管理中心抽调

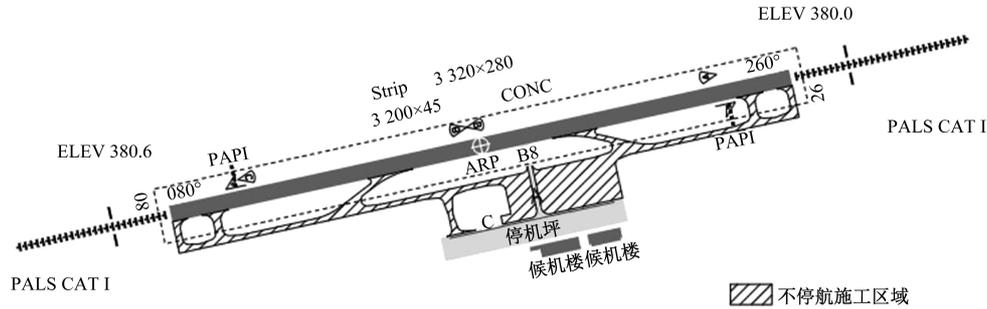


图2 运城盐湖国际机场图



图3 运城盐湖机场国际/港澳台出发大厅

各部门的骨干技术人员组成项目组,加强执行国际航班的保障任务,深化研究各种专项保障措施,为安全高效的保障奠定了基础。鉴于运城盐湖国际机场的国际航运业务尚处于开航的初期阶段,与该业务相关的人员配备、岗位设置以及管理措施等仍在完善提高。所以,对机场运行进行风险评估,提前发现机场运行中的风险和隐患,就显得尤为重要和迫切。首先,对机场运行生产一线工作人员进行访谈,并给各指标进行百分制打分,得到其对各级指标的评价分数情况,见表5。

通过风险评估,得出运城盐湖国际机场的风险值为75.58,风险等级处于良好。表明机场虽存在危险,但尚在可控制的范围之内,应当及时检查机场中存在的潜在风险源,保证机场运行安全。由表5可以看出,运城盐湖国际机场在人为因素方面的安全意识、专业技能与知识熟练度、身体与心理素质和设备因素方面的设备维护与更新等方面都做得比较好,而在环境因素的几个方面和管理因素的员工培训等方面还有提升空间。分析原因,与盐城机场的流量增加、新开国际航线等因素有关。风险评估结果,较准确地反映了机场运行的实际情况,能够评估出机场运行的风险情况,并能够指出机场运行的不足之处和提升建议,对提高盐湖国际机场运行的保障能力,有着重要的意义。

表5 机场运行安全评价指标

准则层	评价层	综合权重	评价层得分	评价层加权得分	总得分
人为因素 A ₁	身体与心理素质 B ₁	0.006 59	80	0.527 20	75.58
	工作负荷与疲劳度 B ₂	0.009 11	70	0.637 70	
	专业技能与知识熟练度 B ₃	0.005 70	80	0.456 00	
	沟通协作能力 B ₄	0.053 39	83	4.431 37	
	安全意识 B ₅	0.018 85	75	1.413 75	
设备因素 A ₂	助航设备完备性 B ₆	0.054 18	70	3.792 60	
	设备维护与更新 B ₇	0.007 47	75	0.560 25	
	特种车辆 B ₈	0.029 31	90	2.637 90	
	通信、导航、监视设备 B ₉	0.039 94	80	3.195 20	
	其他设备设施 B ₁₀	0.029 80	70	2.086 00	
环境因素 A ₃	气象条件 B ₁₁	0.134 41	68	9.139 88	
	跑道入侵 B ₁₂	0.123 48	85	10.495 80	
	机场容量 B ₁₃	0.171 03	80	13.682 40	
	飞行区等级和净空条件 B ₁₄	0.130 13	70	9.109 10	
管理因素 A ₄	员工培训与考核 B ₁₅	0.095 55	65	6.210 75	
	规章制度完备性 B ₁₆	0.033 80	83	2.805 40	
	监督与整改体系健全度 B ₁₇	0.035 94	75	2.695 50	
	安全文化建设 B ₁₈	0.021 32	80	1.705 60	

3 结论

从人为因素、设备因素、环境因素、管理因素4个方面确定风险指标,设计出机场运行安全风险评估方案。根据机场运行生产一线资深员工对各个风险指标的评价,使用AHP-熵值法两种计算方法,算出各级风险指标的综合权重,得到机场运行安全的综合分值。最后对运城盐湖国际机场进行

评估和验证,给出评估结果,指出了改进措施和提升建议。

评价指标分4大类18个,目前,国内外相关研究方法的评价指标还没有统一,个别指标存在差异。在以后的研究中,可以根据不同的机场和运行环境,使用本文的评估方法,对指标体系进行增加和完善。

将层次分析法和熵值法二者结合起来,计算两者的综合权重,降低主观因素对评估结果造成的影响,提高了评估结果的准确性,是机场运行安全评估方法的一种新思路,该方法能够识别潜在风险因素,为机场管理人员做出科学合理的决策提供可靠的依据。对降低机场运行的潜在风险、保障机场运行的安全和民航的安全有重要的意义,在中小型机场和民航领域有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 刘栋. TY 机场安全风险评估研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [2] FAA. Evolution of maintenance management[EB/OL]. (2017-12-25) [2024-11-20]. <http://www.faa.gov/about/initiatives/SMS>.
- [3] DE VIVO C, BARBATO G, ELLENA M, et al. Climate-risk assessment framework for airports under extreme precipitation events; application to selected Italian case studies[J]. Sustainability, 2023, 15: 7300.
- [4] ZU L, LU Y, DONG M. A probabilistic model based on the peak-over-threshold approach for risk assessment of airport controllers' performance[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2024, 5(1): 110-118.
- [5] 石红霞. 国际民航组织概况及标准制定程序[J]. 民航学报, 2021, 5(3): 111-113.
- [6] 周雪芳, 薛列龙, 田文. 机场场面关键节点风险评估方法[J]. 航空计算技术, 2024, 54(1): 46-50, 56.
- [7] 张文平, 黄晋. 基于新开支线航班的运行风险评估体系研究[J]. 民航学报, 2024, 8(1): 84-90.
- [8] 范勇峰, 李轲, 王军平, 等. 基于 CRITIC-TOPSIS 法地铁车站基坑开挖施工安全风险: 以济南地铁 9 号线开源路站为例[J]. 科技和产业, 2024, 24(5): 239-245.
- [9] 董嘉成, 沈大娟. 基于 AHP-熵权法和模糊评价法的民航机场在建工程静态风险体系[J]. 科技和产业, 2024, 24(19): 203-208.
- [10] 丁健. 基于层次分析法的棚户区改造项目风险评估研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [11] 李涵, 牟奇锋, 朱燕翎, 等. 通用机场运行安全保障能力评价研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(3): 283-286.
- [12] 杨昌其, 王馨悦, 张晓磊. 中小机场安全风险评价[J]. 航空计算技术, 2021, 51(3): 37-40.
- [13] 王龙飞, 马楠, 刘森. 新质生产力驱动下基于 AHP-FCE 的物流企业数字化转型能力评估[J]. 科技和产业, 2024, 24(19): 13-18.

Assessment Method of Airport Operation Risk: Taking Yuncheng Salt Lake International Airport as an Example

JING Zengqiang

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The safe operation of the airport is the cornerstone of civil aviation safety. An airport operation risk assessment system was constructed to assess the safety risks of airport operation. It also identifies and eliminates the risk factors and safety hazards in advance. Firstly, using the theory of man-machine-environment-management, the airport operation safety evaluation system was established. Then, using the analytic hierarchy process and the entropy method, the data obtained from the two methods was analyzed and compared, and the weighted comprehensive calculation was carried out to obtain the comprehensive weight of each indicator. Finally, the risk assessment method established in the paper was used to conduct a risk assessment test of the operation of Yuncheng Yanhu Airport. The test results show that the research method in this paper is feasible and effective.

Keywords: airport; risk assessment; AHP(analytic hierarchy process); entropy evaluation method