

# 机场飞行区无人驾驶特种车辆的风险评估

刘兵飞<sup>1</sup>, 汤晓鹏<sup>1</sup>, 张凤<sup>2\*</sup>

1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

2. 中国民航管理干部学院, 北京 100102

**摘要** 通过对机场飞行区无人驾驶特种车辆风险因素的研究, 从内因和外因两个角度建立机场飞行区无人驾驶特种车辆风险评估模型。将三角函数与梯形函数相结合确定改进的白化权函数应用于层次分析(AHP)-灰色理论综合评价方法, 从而对风险因素进行权重判断和综合评估, 以无人驾驶行李拖车为例进行综合风险评估并对较大风险因素提出防范措施。

**关键词** 风险评估; 灰色理论; 层次分析; 特种车; 机场飞行区

飞行区是机场运行安全管理的核心区域, 是一个层次多样、关系复杂、不确定性非常明显且不安全事件集中发生的区域。随着民航业的快速发展, 机场飞行区的设备、车辆和人员拥堵状况不断增加, 错综复杂的飞行区场内运行设施、运行环境以及随时变化的各类运行信息对飞行区车辆的运行安全和运行效率提出更高的要求。统计数据表明, 飞行区内因车辆引发的事故或事故征候大多由人为因素引起<sup>[1]</sup>。车辆无人驾驶技术的优越性将有望改变这种局面。目前, 国内外对机场飞行区无人驾

驶特种车辆研究和应用尚处于起步阶段, 对机场飞行区无人驾驶车辆技术的研究主要零散的分布在除冰和清雪车、行李装运车、维护车等某一种车辆的初步应用测试上。例如: 挪威法格纳斯机场采用了雪帝科技公司(Yeti Snow Technology)研发的基于“应用自动化”原理的无人驾驶扫雪车来提升机场内的除雪作业; 法国戴高乐机场投放了两辆法国自动驾驶巴士公司(Navya)生产的无人驾驶公车并展开测试; 新加坡新翔集团有限公司(SATS)正在测试无人驾驶行李装运车、货物装运车等。对机场

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 民航安全能力建设基金项目(14000900100018J016); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-435); 中央高校基本科研业务费(3122020077)

作者简介: 刘兵飞, 副教授, 研究方向为机场工程, 电子信箱: bingfeiliu2@126.com; 张凤(通信作者), 副教授, 研究方向为机场运行安全管理, 电子信箱: Dylan\_T@163.com

引用格式: 刘兵飞, 汤晓鹏, 张凤. 机场飞行区无人驾驶特种车辆的风险评估[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 83-91; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.19.010

飞行区无人驾驶特种车辆的风险评估研究更是少之又少,很难体现评估方法和结果的科学性和客观性。在已知的机场风险评估中,赵贤利、罗帆<sup>[2]</sup>提出复杂网络模型,通过建立数学模型与拓扑模型对飞行区风险因素进行分析;王永刚、杨传秀<sup>[3]</sup>将 Multi-Agent 方法应用于机场风险评估,其为风险评价提供了新的思路;费春国、潘伟鹏<sup>[4]</sup>运用层次分析法和模糊评价法对电动特种车辆运行风险做出评估,评估结果表明该方法提高了评估结果的精确度;Maurino<sup>[5]</sup>从人的心理变化角度对航空安全展开分析,结果表明工作人员的心理素质对机场安全具有重要影响;Xenidis 等<sup>[6]</sup>运用模糊分析法,对机场风险因素进行风险分析,并对风险因素的重要程度进行量化处理。

就国外无人驾驶车辆的发展情况来看,目前的技术研究路线有两条,一条是以谷歌公司为代表的由计算机完全代替驾驶员操纵汽车的研究路线,另一条是以特斯拉为代表的由计算机辅助驾驶员操纵汽车的研究路线<sup>[7]</sup>。谷歌公司为最早研发无人驾驶技术的公司之一,技术研发成本高,创新性成果多,其研发目的是将计算机系统完全取代人的操作,高昂的设备成本是限制其实现商业化生产的主要原因之一。与谷歌公司不同的是,特斯拉的无人驾驶研究未采用价格昂贵的激光雷达设备,而是采用摄像头和具有 40 倍计算能力的车载处理器,最大程度的控制成本,相对于谷歌公司的无人驾驶汽车还处于测试阶段,特斯拉的无人驾驶汽车已实现了商业化的量产,并拥有了自动驾驶汽车商业模式<sup>[8]</sup>。国内无人驾驶技术发展较晚,目前主要依赖于车企与高校、科研院所合作来推动无人驾驶智能辅助驾驶系统的研发,例如,北京汽车股份有限公司研发的无人驾驶汽车已经达到路试水平,研制出多项自动辅助驾驶技术;奇瑞汽车股份有限公司与武汉大学开展自动驾驶汽车研究等。随着人工智能的发展,国内部分拥有技术优势的互联网公司跻身无人驾驶领域。百度在线网络技术(北京)有限公司作为国内无人驾驶技术研发的引领者之一,通过使用高精度地图、大数据和人工智能等前沿技术进行无人驾驶技术研发,其核心技术是基于计算机

及人工智能模拟人类大脑的思维方式,为无人驾驶的信息处理提供了保证<sup>[9]</sup>。除百度之外,北京京东世纪贸易有限公司、滴滴(中国)科技有限公司等也将无人驾驶技术作为重大战略布局。

随着互联网技术以及高精度地图的不断进步,无人驾驶技术将愈加成熟,其能够显著降低人为因素的影响,低风险性和优越性将带来无可比拟的社会效益和经济效益。因此,作为新时代民航强国建设进程中“四型机场”建设的发展方向,建立一套基于机场飞行区综合环境下的无人驾驶特种车辆运行风险评估体系,对后续无人驾驶特种车辆在机场飞行区的应用和推广具有深远的应用价值和意义。

## 1 机场飞行区无人驾驶特种车辆风险因素分析

在综合文献分析和现场调研的基础上,将机场飞行区无人驾驶特种车辆的总风险分为内在风险  $C_1$  和外在风险  $C_2$ 。将内在风险中的硬件风险  $K_1$ 、软件风险  $K_2$  和网络风险  $K_3$  与外在风险中的场地设施风险  $K_4$ 、环境风险  $K_5$ 、管理风险  $K_6$  和车辆风险  $K_7$  确定为影响飞行区无人驾驶特种车辆的一级风险指标,每个一级风险指标中包含多个二级风险指标  $k_{ij}$ 。其中,  $i=1, 2, \dots, 7; j=1, 2, \dots, s$ ,  $s$  表示为一级风险指标  $K_i$  下的二级风险指标  $k_{ij}$  个数,具体如图 1、图 2 所示。

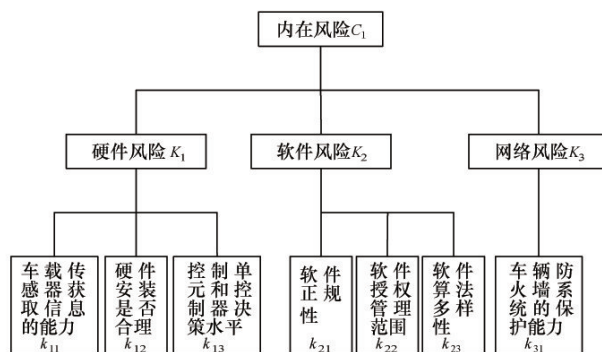


图1 内在风险因素

对于硬件风险来说,由于无人驾驶特种车辆的运行完全依赖于车载传感器对机场飞行区地面障碍物、车道线和道路标识以及车辆自身速度、加速度、行车方向和地理位置等数据信息的获取,传感

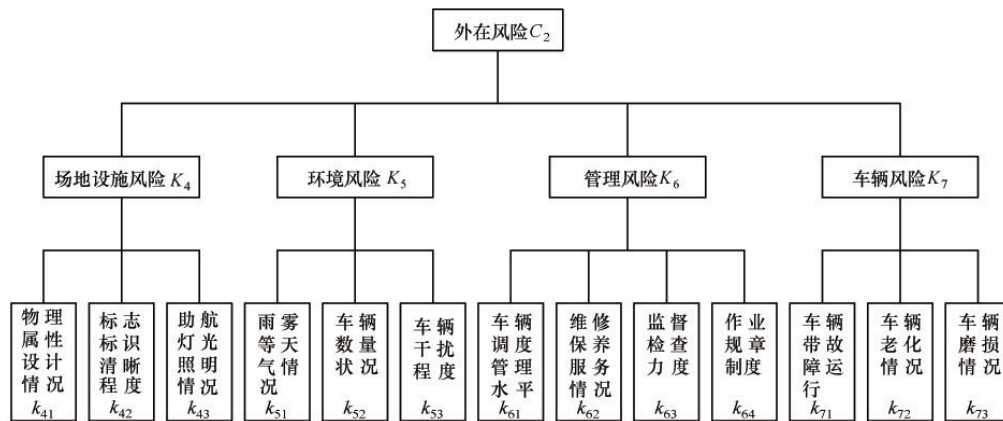


图2 外在风险因素

器性能与安装位置对信息获取精度十分关键。控制作为无人驾驶特种车辆最底层系统,其主要任务是精准执行已规划好的机场行车路线,并能准确为特种车辆执行机构提供必要的刹车、制动、转向等信号,当控制单元和控制器的决策水平较低时,执行机构获取信号的波动较大,极易引发车辆事故。所以,选择控制单元和控制器决策水平、车载传感器获取信息能力以及硬件安装是否合理作为硬件风险的子风险指标。

对于软件风险来说,由于无人驾驶车辆研发时间短,技术不成熟,其智能算法研究大多采取封闭式测试数据,与实际工况差距较大,当未经长期实践检验而将无人驾驶算法仓促进行应用,本身就存在巨大风险。另外,软件的应用范围和软件自身存在被盗或被破解的情况也威胁着无人驾驶车辆的推广。所以,选择软件正规性、软件授权管理范围及软件算法多样性作为软件风险的子风险指标。

对于网络风险来说,由于无人驾驶特种车辆网联化,一旦网络防火墙被破坏,网络黑客篡改原始系统代码远程控制无人驾驶特种车辆,恶意操纵制动和转向系统,将会造成难以估量的机场地面事故<sup>[10]</sup>。所以,选择车辆防火墙系统的保护能力作为软件风险的子风险指标。

对于场地设施风险来说,机场飞行区场地设施物理属性的设计应遵循连续、顺畅,线形光滑,不应出现曲率或坡度较大的情况。另外,标志标识及助航灯光会影响车载传感器数据采集精度,从而影响车辆对路况的判断。所以,选择物理属性设计情

况、标志标识清晰程度和助航灯光照明情况作为场地设施风险的子风险指标。

对于环境风险来说,飞行区无人驾驶特种车辆在大雨、大雾天气作业时,激光测距器等环境感知传感器数据采集精度下降甚至出现失效的风险。另外,在多车协同作业时,车辆作业空间有限,车辆数量较多且相互干扰,对车辆的识别及规避障碍物提出更高要求。所以,选择雨雾等恶劣天气状况、车辆数量状况及车辆干扰程度作为环境风险的子风险指标。

对于管理风险来说,由于目前大部分飞行区特种车辆的维修保养是以合约的方式进行业务外包,监督检查力度松懈时,维修保养水平参差不齐<sup>[11]</sup>。另外,特种车辆是由机场指挥部进行整体管控,在大型机场或航班密集时刻,特种车辆需对多个航班进行服务,当没有一套科学、高效的调度指挥管理方法和作业规章制度,特种车辆在工作时极可能出现车辆与车辆、车辆与航空器之间的刮蹭。所以,选择车辆维修保养服务情况、监督检查力度、车辆调度管理水平和作业规章制度作为管理风险的子风险指标。

对于车辆风险来说,由于飞行区作为特殊的工作场地,特种车辆作业时的实际运行功率远远低于额定功率,加剧了车辆磨损,对特种车辆寿命产生一定影响。另外,中国机场特种车辆重时效轻维修保养,存在零部件老化或车辆带故障运行现象,作业过程中可能发生车辆零部件失效的危险。所以,选择车辆带故障运行情况、车辆老化情况和车辆磨

损情况作为车辆风险的子风险指标。

## 2 建立层次分析-灰色理论综合评估方法

### 2.1 无人驾驶特种车辆风险指标的判断矩阵

为了比较同级风险指标对上级风险指标的影响程度,需由行业专家根据自身经验和已有历史经验对风险指标进行量化操作以获得判断矩阵  $B=(b_{ij})_{n \times n}$ ,  $n$  表示为一级风险指标  $K_i$  个数或一级风险指标  $K_i$  下的二级风险指标  $k_{ij}$  个数,当表示前者  $n=7$ ,当表示后者时则  $n=s$ ,具体判断矩阵  $B$  如下:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

通常情况下,为了提高量化精度而采用标度的方式进行量化,标度量化表如表1<sup>[4]</sup>所示。根据表1可知判断矩阵  $B$  中的  $b_{ii} = 1$ ,  $b_{ij} = \frac{1}{b_{ji}}$ ,即指标  $i$  较指标  $j$  的重要程度与指标  $j$  较指标  $i$  的重要程度成倒数关系。

表1 标度量化

标度值	含义
1	指标 $i$ 与 $j$ 同等重要
3	指标 $i$ 比 $j$ 稍微重要
5	指标 $i$ 比 $j$ 明显重要
7	指标 $i$ 比 $j$ 非常重要
9	指标 $i$ 比 $j$ 极端重要
2,4,6,8	上述相邻对比中值
倒数	指标 $j$ 比 $i$ 的重要程度

### 2.2 风险因素权重计算及一致性检验

将判断矩阵  $B$  的列元素进行归一化,得到矩阵  $C=(c_{ij})_{n \times n}$

$$c_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

再将  $C$  的行元素进行求和处理得到  $\omega'_i$

$$\omega'_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

再将  $\omega'_i$  进行归一化操作,操作结果为  $\omega_i$

$$\omega_i = \frac{\omega'_i}{\sum_{j=1}^n \omega'_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由上述操作得到特征向量为

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (5)$$

判断矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$  的计算公式

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{\omega_i} \quad (6)$$

式中,  $i$  表示第  $j$  个分量。

构造无人驾驶特种车辆风险评估判断矩阵时,其成对比较矩阵通常不是一致阵,为了能将判断矩阵计算出的特征向量作为比较风险指标的权值向量,需要对其不一致程度进行检验,将其不一致程度设置在较小许可范围之内。

根据  $\lambda_{\max}$  计算一致性检验参数  $A$

$$A = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (7)$$

$A=0$  时,判断矩阵  $B$  完全一致;  $A$  越大,判断矩阵  $B$  不一致程度越高,但无法确定矩阵不一致性范围,所以,需要借助一致性指标  $R_0, R_0$  的具体经验值如表2<sup>[12]</sup>所示,定义一致性比例参数  $A_{R_0}$ ,一致性比例参数  $A_{R_0}$  与一致性检验参数  $A$  的关系如式(8)所示。

$$A_{R_0} = \frac{A}{R_0} \quad (8)$$

当  $A_{R_0} < 0.1$  时,一致性检验达到要求;当  $A_{R_0} \geq 0.1$ ,需要对判断矩阵进行重新构造。

表2  $R_0$  数值

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_0$	0	0	0.58	0.96	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

### 2.3 建立无人驾驶特种车辆风险评分矩阵

根据李克特5级量表原则,将飞行区无人驾驶特种车辆风险指标等级划分为5级,评价等级是定性分析的结果,为了实现评价等级的量化,需要将评价等级映射到评分等级。1级风险至5级风险分别赋予1分、3分、5分、7分、9分,当指标风险等级处于相邻两个风险等级之间,对应取值为2分、4分、6分、8分、10分,分值越高则表明风险程度越

高。现有  $m$  位行业专家参与风险评价,专家编号为  $l=1, 2 \dots m$ 。设第  $m$  位行业专家对飞行区无人驾驶特种车辆在一级风险指标  $K_i$  下的二级风险指标  $k_{ij}$  的分数为  $d_{ijm}, j=1, 2 \dots s$ ,通过对  $m$  个专家的评级指标打分表进行汇总,可知飞行区无人驾驶特种车辆风险指标状况。其评分矩阵  $D$  为

$$D = \begin{bmatrix} d_{i11} & d_{i12} & \dots & d_{i1m} \\ d_{i21} & d_{i22} & \dots & d_{i2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{is1} & d_{is2} & \dots & d_{ism} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.4 飞行区无人驾驶特种车辆灰色评估灰类

为了确定风险指标的灰色程度,需要对其进行灰色等级划分,令  $u=1, 2, 3, 4, 5$  分别代表低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险。在实际应用中,大多使用单一函数做为白化权函数,为使评价结果更可靠,本研究将三角函数与梯形函数相结合做为改进的白化权函数。具体函数图像如图3所示,对应的白化权函数为式(10)~式(12)。

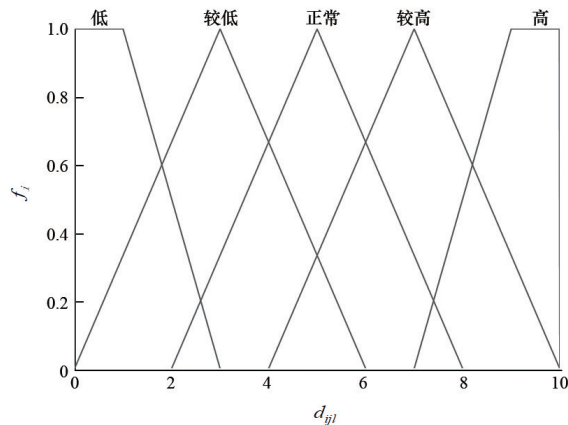


图3 合成白化权函数

1) 一级风险(低风险)的灰类。白化权函数为:

$$f_1(d_{ijl}) = \begin{cases} 1, & d_{ijl} \in [0, 1] \\ \frac{d_{ijl} - 1}{2}, & d_{ijl} \in (1, 3] \\ 0, & d_{ijl} \in [0, 3] \end{cases} \quad (10)$$

2) 中间风险的灰类。白化权函数为

$$f_u(d_{ijl}) = \begin{cases} \frac{d_{ijl} - t}{3}, & d_{ijl} \in [t, t + 3] \\ \frac{d_{ijl} - t - 3}{3}, & d_{ijl} \in (t + 3, t + 6] \\ 0, & d_{ijl} \in [t, t + 6] \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $t=0$ , 2级风险(较低风险);  $t=2$ , 3级风险(中等风险);  $t=4$ , 4级风险(较高风险)

3) 5级风险(高风险)的灰类。白化权函数为

$$f_5(d_{ijl}) = \begin{cases} \frac{d_{ijl} - 7}{2}, & d_{ijl} \in [7, 9] \\ 1, & d_{ijl} \in (9, +\infty) \\ 0, & d_{ijl} \in [7, +\infty) \end{cases} \quad (12)$$

### 2.5 灰色评价系数及评价权向量、权矩阵的求解

由灰色原理可知,评分专家的打分结果即为相应的灰数。例如,对评价指标  $k_{ij}$  进行打分时,打分结果  $d_{ij1}, d_{ij2} \dots d_{ijm}$  即为灰数,则其属于第  $u$  个灰类的白化权为:

$$f_u(d_{ij1}), f_u(d_{ij2}), \dots, f_u(d_{ijm}) \quad (13)$$

评价指标  $k_{ij}$  的第  $u$  个灰类的白化权之和即为评价系数:

$$x_{iju} = \sum_{l=1}^m f_u(d_{ijl}) \quad (14)$$

评价指标  $k_{ij}$  属于所有灰类的评价系数之和为总评价系数:

$$x_{ij} = \sum_{u=1}^5 \sum_{l=1}^m f_u(d_{ijl}) \quad (15)$$

评价指标  $k_{ij}$  属于第  $u$  灰类的评价系数与总的评价系数之比  $q_{iju}$  为评价权,其表示  $k_{ij}$  属于第  $u$  个灰类的重要程度,比值越大,表明该评价指标  $k_{ij}$  更接近于此灰类  $u$ 。

$$q_{iju} = \frac{x_{iju}}{x_{ij}} = \frac{\sum_{l=1}^m f_u(d_{ijl})}{\sum_{u=1}^5 \sum_{l=1}^m f_u(d_{ijl})} \quad (16)$$

评价指标  $k_{ij}$  处于不同灰类下的评价权构成评价权向量为

$$q_{ij} = (q_{ij1}, q_{ij2} \dots q_{ij5}) \quad (17)$$

进而得到的飞行区无人驾驶特种车辆一级风险指标  $K_i$  下的二级风险指标  $k_{ij}$  处于不同灰类下的权矩阵为

$$Q_i = \begin{bmatrix} q_{i1} \\ q_{i2} \\ \vdots \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{i11} & q_{i12} & q_{i13} & q_{i14} & q_{i15} \\ q_{i21} & q_{i22} & q_{i23} & q_{i24} & q_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{in1} & q_{in2} & q_{in3} & q_{in4} & q_{in5} \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 2.6 综合评价风险指标

对飞行区无人驾驶特种车辆在一级风险指标  $K_i$  下的二级风险指标  $k_{ij}$  的权重  $F_i$  进行计算:

$$F_i = \omega_i Q_i = [f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i5}] \quad (19)$$

式中,  $f_{iu} = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} q_{ju}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$

以权重  $F_i$  为行构成飞行区特种车辆风险评估 1 级指标  $K_i$  的灰色权矩阵  $F$

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & f_{n4} & f_{n5} \end{bmatrix} \quad (20)$$

机场飞行区特种车辆风险评估的综合结果  $R$  可由一级权重指标  $W$  与权矩阵  $F$  相乘得到

$$R = W \cdot F = [r_1, r_2, r_3, r_4, r_5] \quad (21)$$

其中  $r_u = \sum_{i=1}^n \omega_i f_{iu}$

## 2.7 对风险评估结果进行综合分析

采用最大隶属度方式进行风险等级评估, 无人驾驶特种车风险因素的综合评估结果为  $R_r = \max_{1 \leq u \leq 5} \{r_u\}$ , 以最大值作为风险的参考值, 该参考值属于第  $u$  评判等级<sup>[13]</sup>, 则评估结果就属于第  $u$  等级, 当评价结果为较高风险或高风险时需做相应防范处理。

## 3 机场飞行区无人驾驶特种车辆风险评估实例

将上述综合风险评估模型应用于机场飞行区无人驾驶行李拖车中, 利用层次分析法求出不同风险指标的权重关系并与灰色理论相结合对无人驾驶行李拖车做出综合风险评估。对风险指标进行风险比较和风险程度打分的专家组包括高校教授、民航安全管理专家、某技术研发有限公司专家及机场飞行区一线工作人员。

1) 根据层次分析法确定各级风险指标权重, 现以硬件风险为例。

构造硬件风险判断矩阵  $B_1$ :

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

将  $B_1$  代入式(2)中并经过式(3)和式(4)的运算得到 2 级风险指标权值  $\omega_1$  为

$$\omega_1 = [w_{11}, w_{12}, w_{13}]^T = [0.5390, 0.1638, 0.2972]^T$$

将  $\omega_1$  和  $B_1$  代入式(6)得到判断矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{3}(3.0145 + 3.0040 + 3.0091) = 3.0092$$

将  $\lambda_{\max}$  代入式(7)中得到一致性检验参数  $A$  为

$$A = \frac{3.0092 - 3}{3 - 1} = 0.0046$$

将  $A$  代入式(8)中得到一致性比例参数  $A_{R0}$  为

$$A_{R0} = \frac{0.0046}{0.58} = 0.0079 < 0.1$$

所以, 判断矩阵构造合理。

应用上述理论计算 1 级风险指标权重及其下的 2 级风险指标权重, 具体结果如表 3 所示。

2) 综合考虑遴选 5 位专家组成员对风险指标打分。以硬件风险指标为例对其二级风险指标打分, 得到的评分矩阵为  $D_1$  为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 8 & 9 & 8 \\ 9 & 8 & 6 \\ 8 & 8 & 7 \\ 7 & 7 & 8 \\ 8 & 9 & 7 \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 工具箱编辑灰色函数, 输入评分矩阵, 则硬件风险的 2 级风险指标灰色系数为

$$u = 1, x_{111} = 0; u = 2, x_{112} = 0; u = 3, x_{113} = 3.6667; u = 4, x_{114} = 2.6667; u = 5, x_{115} = 2.5000$$

灰色系数之和为

$$x_{11} = \sum_{u=1}^5 x_{11u} = 8.8334$$

将上述  $x_{11u}$  和  $x_{11}$  的值代入式(16)得到评价指标  $k_{11}$  处于不同灰类下的评价权构成评价权向量  $q_{11}$  为

$$q_{11} = [q_{111}, q_{112}, q_{113}, q_{114}, q_{115}] = [0, 0, 0.4151, 0.3019, 0.2830]$$

同理, 计算  $k_{12}$ 、 $k_{13}$  处于不同灰类下的评价权构成评价权向量为

表3 风险系统指标权重

$W$	$\lambda_{max}$	$A$	$A_{R0}$
[0.5390, 0.1638, 0.2972] (硬件风险 $W_1$ )	3.0092	0.0046	0.0079
[0.2605, 0.1061, 0.6334] (软件风险 $W_2$ )	3.0386	0.0192	0.0421
[0.1096, 0.5813, 0.3091] (场地设施风险 $W_4$ )	3.0078	0.0018	0.0042
[0.5746, 0.3094, 0.1020] (环境风险 $W_5$ )	3.0065	0.0033	0.0733
[0.1650, 0.0642, 0.4785, 0.2933] (管理风险 $W_6$ )	4.1075	0.0058	0.0061
[0.6334, 0.1061, 0.2605] (车辆风险 $W_7$ )	3.0030	0.0015	0.0033
[0.3674, 0.2236, 0.0911, 0.0448, 0.0366, 0.1550, 0.0815] (一级风险指标权重 $W$ )	7.0733	0.0122	0.0093

$$q_{12} = [q_{121}, q_{122}, q_{123}, q_{124}, q_{125}] = [0, 0, 0.3076, 0.3462, 0.1111]$$

$$q_{13} = [q_{131}, q_{132}, q_{133}, q_{134}, q_{135}] = [0, 0.1111, 0.4074, 0.3704, 0.1111]$$

用  $q_{11}, q_{12}, q_{13}$  构造权重矩阵  $Q_1$  为

$$Q_1 = [q_{11}, q_{12}, q_{13}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4151 & 0.3019 & 0.2830 \\ 0 & 0 & 0.3076 & 0.3462 & 0.3462 \\ 0 & 0.1111 & 0.4074 & 0.3704 & 0.1111 \end{bmatrix}$$

将  $\omega_1, Q_1$  代入式(19)中得综合评估结果为

$$F_1 = \omega_1 Q_1 = [0, 0.0330, 0.3952, 0.3295, 0.2423]$$

根据上述理论计算总风险综合评估值及其下的一级风险综合评估值,具体如表4所示,对应的直观形式如图4(a)~图4(h)所示。

依据最大隶属度原则,表4的总风险  $F$  中最大值为 0.3837, 0.3837 属于风险级别当中的正常风险,或根据图4(h)可知,综合评估风险值的最大值

表4 灰色综合评估值

$F$ (总风险)	[0.0360, 0.1523, 0.3837, 0.2736, 0.1544]
$F_1$ (硬件风险)	[0, 0.0330, 0.3952, 0.3295, 0.2423]
$F_2$ (软件风险)	[0.0111, 0.2717, 0.3712, 0.2610, 0.0850]
$F_3$ (网络风险)	[0, 0.0806, 0.3870, 0.3574, 0.1750]
$F_4$ (场地设施风险)	[0.1350, 0.3254, 0.3692, 0.1408, 0.0296]
$F_5$ (环境风险)	[0.0862, 0.2058, 0.3931, 0.2493, 0.0656]
$F_6$ (管理风险)	[0.0871, 0.1669, 0.3689, 0.2512, 0.1259]
$F_7$ (车辆风险)	[0.1261, 0.2783, 0.3765, 0.1329, 0.0862]

位于风险等级3,所以,评价结果表明该飞行区无人驾驶行李拖车的风险等级属于正常风险。

由风险系统指标权重表3可知,1级风险指标权重向量  $W$  中的最大值对应着风险评估模型中的硬件风险,则影响无人驾驶行李拖车的最大风险因素为硬件风险,由硬件风险指标权重向量  $W_1$  可知,其最大值对应着硬件风险下的车载传感器信息获取的能力。因此,车载传感器信息获取能力对机场飞行区行李拖车的风险影响程度最大,其原因是行

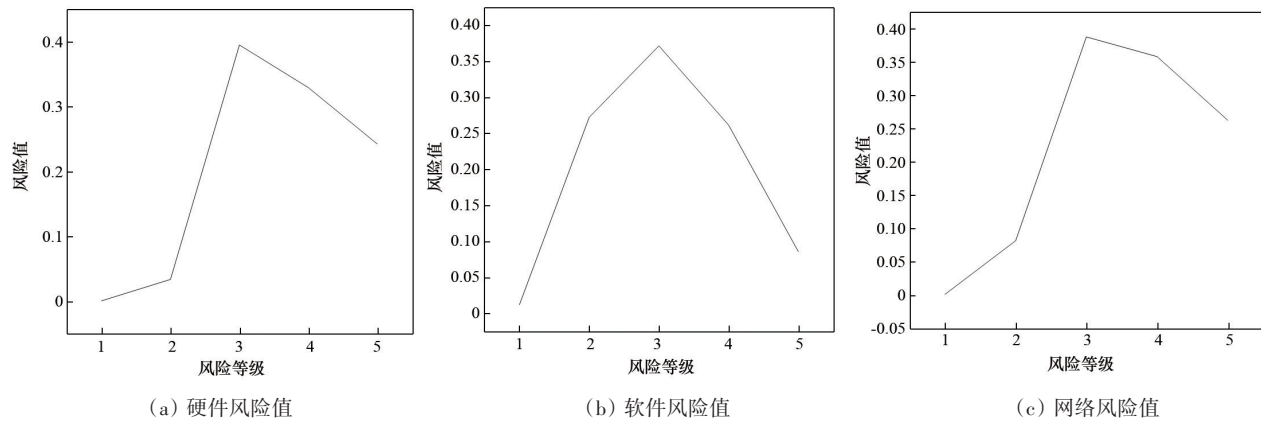


图4 一级风险及综合风险评估值

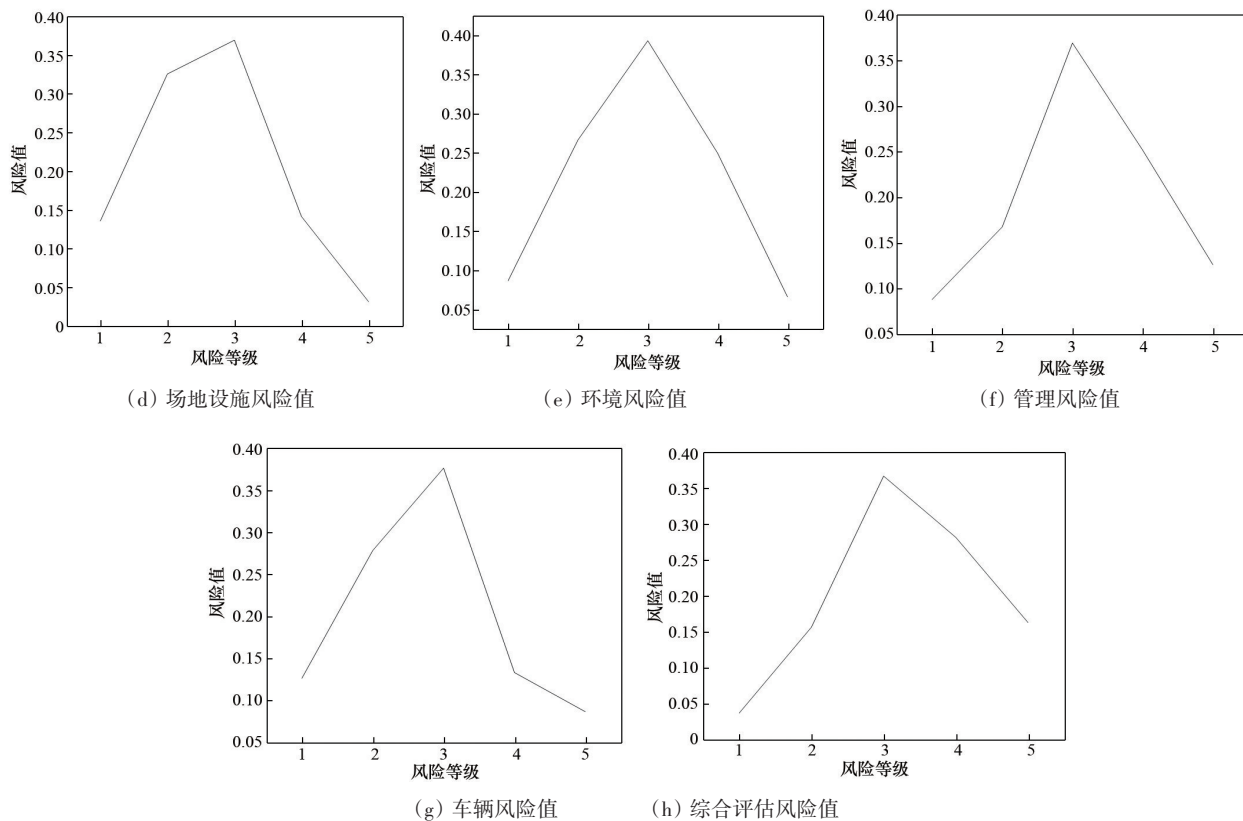


图4 一级风险及综合风险评估值(续)

李拖车的运行主要以车载传感器系统的感知性能为前提,无人驾驶行李拖车通过摄像头、激光雷达、毫米雷达等多种感知元件,对机场交通标识、周围车辆及障碍物等进行综合感知,传感器系统相当于无人驾驶行李拖车的“眼睛”,当对环境感知精度较低或天气状况恶劣时会造成数据获取存在偏差,极易导致严重的风险事故。其次,软件风险中的软件算法多样性和管理风险中的监督检查力度等因素的影响也不容忽视,在确保感知数据准确的前提下,软件算法越丰富,当行李拖车遇到复杂情况时,越能对数据做出准确预测和判断,从而按照软件算法设定的轨迹路线平稳运行。由于机场特种车大多重运营轻维护保养,一旦监督检查制度松懈,极可能出现车辆关键零部件老化或磨损严重而未被更换的现象,从而可能导致不必要事故的发生。

3) 机场飞行区无人驾驶行李拖车降低运行风险措施。

(1) 在控制成本的前提下安装精度较高的传感器,采用多传感器融合技术对环境信息进行综合获取并定期对车载传感器进行故障诊断。

(2) 加大对无人驾驶技术智能算法的研究,算法多样性能保证在不同状况下,无人驾驶特种车辆都能进行快速准确的反馈。

(3) 建立完善的防火墙系统,创造安全的网络环境。

(4) 完善飞行区内场地设施建设,避免出现车道线不清晰、助航灯光照明不良等情况。

(5) 制定科学、高效的无人驾驶特种车辆调度管理方法和监督检查制度。

(6) 培养专业的车辆后勤保障人员,定期对无人驾驶特种车辆进行故障检查和维护,最大程度减少车辆在运行过程中的风险。

## 4 结论

人工智能时代背景下,无人驾驶车辆技术前景愈加明朗。为了提高机场的运行安全裕度和效率,降低人为风险,无人驾驶特种车辆进入机场飞行区成为新时代民航强国建设进程中“四型机场”的发展趋势。本研究从无人驾驶特种车辆自身的技术

风险与传统特种车辆的外在风险考虑,建立一套基于机场飞行区综合环境下的无人驾驶特种车辆风险评估体系,采用层次分析法确定指标权重,通过改进的白化权函数对无人驾驶特种车辆风险进行灰色综合评估,该方法对未来机场飞行区无人驾驶特种车辆的风险评估提供了一种思路,对未来机场飞行区无人驾驶特种车辆预防风险隐患提供依据,具有很好的普适性。

### 参考文献(References)

- [1] 王永刚, 高宇恒. 中大型机场停机坪安全风险分析与对策研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1716-1721.
- [2] 赵贤利, 罗帆. 基于复杂网络理论的机场飞行区风险演化模型研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 15(4): 31-33.
- [3] 王永刚, 杨传秀. 基于 Multi-Agent 的机场安全风险模型研究[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(3): 76-79.
- [4] 费春国, 潘伟鹏. 机坪电动特种车辆运行安全风险研究[J]. 现代电子技术, 2017, 40(12): 34-38.
- [5] Maurino D E. Safety prejudices, training practices, and CRM: Amid point perspective[J]. International Journal of Aviation Psychology, 2007, 9(4): 413-422.
- [6] Xenidis Y, Gkocmas N. Safety, reliability and risk analysis; beyond the horizon[C]//Proceedings of the European Safety and Reliability Conference. Amsterdam: ESREL, 2013.
- [7] 王钦普, 赵佳, 赵浩. 无人驾驶汽车发展面临的挑战与建议[J]. 客车技术与研究, 2016, 38(6): 2-6.
- [8] 兰京. 无人驾驶汽车发展现状与关键技术分析[J]. 内燃机与配件, 2019(15): 209-210.
- [9] 姜允侃. 无人驾驶汽车的发展现状及展望[J]. 研究与设计, 2019, 35(5): 60-65.
- [10] 于赫, 秦贵和, 孙铭会, 等. 车载 CAN 总线网络安全问题及异常检测方法[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [11] 蒋丽. 特种车辆机坪运行安全研究[J]. 民航管理, 2014(8): 73-74.
- [12] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- [13] Zhang H, Gao D, Hao Z. Risk analysis of extended reach wells in the Liuhua Oilfield, South China Sea, based on comprehensive fuzzy evaluation method[J]. Petroleum Science, 2009(2): 172-175.

## Risk assessment study for driverless special vehicles in airport flight area

LIU Bingfei<sup>1</sup>, TANG Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>2\*</sup>

1. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China

**Abstract** With rapid development of driverless technology, driverless special vehicles into airport flight zone will become a future airport development trend. At present, there is no reasonable evaluation system for the operation risk assessment of driverless special vehicles in the airfield. Based on the study of risk factors of driverless special vehicles in the airfield, this paper establishes a risk assessment model of driverless special vehicles in the airfield from the perspectives of internal and external factors. The trigonometric function and trapezoidal function are combined to determine the improved whiteness weight function, which is then applied to the analytic hierarchy process (AHP)-grey theory comprehensive evaluation method so as to judge the weight and evaluate the risk factors comprehensively. Finally, an comprehensive risk assessment is carried out by taking the driverless luggage trailer as an example and the preventive measures are proposed against larger risk factors.

**Keywords** risk assessment; grey theory; ahp; special vehicle; airport area ●



(责任编辑 王丽娜)