

文章编号:1674-8190(2016)03-338-05

# 运用多重属性风险评估量化跑道侵入严重等级

罗军,李森苗

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院,广汉 618307)

**摘要:** 随着航空运输业的迅速发展,交通密度逐渐增大,机场跑滑系统越来越复杂,航空安全问题也随之增多,其中跑道侵入是影响航空安全的重要方面。引起跑道侵入的因素多种多样,本文主要研究人为因素对跑道侵入严重性等级的影响,根据跑道侵入严重等级的划分,利用多重属性风险评估模型对跑道侵入严重性等级进行量化,通过实例计算和对所得数据的分析,表明多重属性风险评估模型可为跑道系统提供通用的跑道侵入风险评估方法,并指出实际工作中存在的问题及预防措施。

**关键词:** 跑道侵入;多重属性风险评估;威胁指数;人为因素

**中图分类号:** X913.4;V328

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.03.011

## Application of Multi-attribute Risk Assessments in Quantification of Runway Incursion Severity Classification

Luo Jun, Li Miaomiao

(School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** With the rapid development of aviation transportation, the traffic density increases gradually, the airport runway and taxiway system becomes complex. Aviation safety problems stand out. Among them the runway incursion is an important aspect. There are many causes of runway intrusion. This paper focuses on human factors affecting the runway incursion severity classification. Based on the runway incursion severity classification, this paper adopts multi-attribute risk assessment model to quantify the runway incursion severity classification. And try to illustrate the feasibility of this method in quantification of runway incursion severity classification through examples. Finally, the writer points out the problems in practical work through analyzing obtained data and presents the preventive measures.

**Key words:** runway incursion; multi-attribute risk assessments; threat index; human factors

## 0 引言

随着航空运输业的迅速发展,表现出来的航空安全问题也逐渐增多,其中,跑道安全问题呈递增趋势。跑道侵入是影响跑道安全的核心问题之一,需要得到足够的关注与研究。

跑道侵入是指发生在机场跑道范围内,涉及地面航空器、车辆、人员或物体,造成碰撞事故,或导

致航空器起飞、准备起飞、降落或准备降落时间间隔不足的任何事件。根据跑道侵入事件所造成的后果的严重程度,将跑道侵入划分为A,B,C,D,E五个等级:A类——勉强避免发生碰撞;B类——存在避免飞机碰撞事故发生的可能性,且只能采取应急的纠正或逃避响应的措施;C类——飞机不易发生碰撞事故,若情况发生,也能有足够的反应距离和时间来避免碰撞事故;D类——此类事件符合跑道侵入的定义,尽管有机场人员和机器设备在地面保护区域出现,但是发生碰撞的可能性很小或几乎没有;E类——信息不足无法得出结论(由于E类跑道侵入的特殊性,本文暂不讨论)。

收稿日期:2016-04-26; 修回日期:2016-05-31

修回日期:中国民航飞行学院科研创新项目(X2014-28)

通信作者:李森苗,1017001209@qq.com

目前,关于跑道侵入风险评估的问题,国内外已进行了较多研究。国内,罗军等<sup>[1]</sup>基于模糊集和改进的 TOPSIS 方法进行跑道侵入风险评估,指出管制员的工作负荷在管制体系中对跑道侵入的影响最大,表明工作负荷是影响跑道侵入事件发生的一个重要指标;许桂梅等<sup>[2]</sup>在基于人因可靠性的跑道侵入风险定量分析中指出,飞行员、管制员及车辆/行人中有一方出现差错时,跑道侵入都有可能发生;唐辛欣等<sup>[3]</sup>采用灰色聚类方法和专家打分方法相结合的方法,对机场跑道侵入人为风险进行综合评价。上述研究多将人的因素作为主要影响因素进行分析,所建立的评估模型或方法均有与之相对应的数据系统及风险模型,各种评估方法自成体系,各具特色,均具有一定的参考价值。国外, M. Janic<sup>[4]</sup>分析 1965~1998 年发生的航空事故并找出引发事故的原因,采用不同方法评估了民航系统的安全性;Dohyun Kim 等<sup>[5]</sup>以韩国金浦国际机场为例,运用层次分析法对跑道侵入风险赋予权重,采用故障树分析法进行风险评估和频率估算,分析结果验证了人为差错对跑道侵入的影响;Ellen C. Rogerson 等<sup>[6]</sup>利用因子层次分析法对美国 80 多个机场的安全风险进行了分析,该方法采样数目较多,有效地避免了由于专家内部意见不统一而造成的共识心理。

跑道侵入风险评估理论方法的重难点多集中在各影响因素的权重分配<sup>[7-9]</sup>上,但对于不同严重等级跑道侵入的研究尚未建立具体的评估模型。多重属性风险评估模型<sup>[10]</sup>可提供直观的机制和方便的框架来进行定量的风险评估,用于量化跑道侵入的严重性等级,该方法使用过程简单易行,其模型建立均以数据为基础,通过计算展开分析,与原有的跑道侵入风险评估模型相比,避免了人的主观性对评估结果的影响。

本文采用多重属性风险评估模型来量化跑道严重性等级,以飞行员、管制员及车辆/行人为多重属性风险评估的三种属性,根据单个因素导致跑道侵入发生次数与跑道侵入发生总次数的比值大小进行排序,最后进行威胁指数的计算,进而评价机场跑道系统的安全性。

## 1 多重属性风险评估模型

多重属性风险评估模型认为不同属性之间存

在传递性,即某种属性出现问题时,可能会导致另一种属性也出现问题,例如管制员的失误可能会导致飞行员操作失误。不同属性之间存在优先独立性,不论哪种因素出现失误,都有先后顺序,先出现失误的一方是结果的主要责任方,对事故的发生负主要责任。

### 1.1 模型的构建

基于多种因素共同促成不安全事件的发生,多重因素风险评估模型亦被称为附加价值模型<sup>[10]</sup>。其表达式为

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1, n} w_i v_i(x_i) \quad (1)$$

式中: $w_i$ 为因素 $x_i$ 的权重值; $v_i(x_i)$ 为因素 $x_i$ 的值函数,其具体定义及算法详见 1.2 节; $i$ 为多重属性风险评估的三种属性,代表三种不同的人为因素,即飞行员( $i=1$ )、管制员( $i=2$ )及车辆/行人( $i=3$ ); $v$ 为出现不安全事件的可能性值函数,本文表示出现跑道侵入的可能性。

### 1.2 评估单个属性值函数 $v_i(x_i)$

引起跑道侵入的人为因素主要有飞行员、管制员及车辆/行人,对上述三个属性的值函数进行评估。

$v_i(x_i)$ 的定义为

$$v_j(x_{ij}) = x_{ij} / x_j^* \quad (2)$$

式中: $v_j(x_{ij})$ 为式(1)中的 $v_i(x_i)$ ,其取值范围是 $0 \leq v_j(x_{ij}) \leq 1$ ,即当 $v_j(x_{ij})$ 无限接近 1 时,将直接导致跑道侵入的发生; $x_{ij}$ 为第 $j$ 种结果由第 $i$ 种因素引起的次数; $x_j^*$ 为系统出现第 $j$ 种结果的总次数;本文定义 $j=1, 2, 3$ 分别为出现 A/B 类, C 类, D 类跑道侵入。

### 1.3 评估三种因素的权重( $w_i$ )并对不同因素的主导性排序

在 Swing-Weight 中,分析者要求决策者考虑一个假想情况,当安全管理者发现威胁时,由某种因素导致的最严重结果即为该威胁最终的结果,分析者认为决策者可以通过提高对某种因素的培训使假设结果达到最佳水平。被选为第一的因素是相对比较重要的,即由于该因素的失误而导致跑道侵入发生的次数更多。因此,首先应确定三种人为

因素的权重。

确定权重的方法很多,例如 AHP 法、粗糙集条件信息熵法等<sup>[11-12]</sup>。本文根据 2004~2008 年的数据求得三种人为因素的权重值  $w_i (i=1, 2, 3)$ , 该方法较为简单。

对不同因素的主导型排序是指计算出三种人为因素的权重之后,再根据权重大小进行排序。例如,1999~2007 年,美国 450 家管制机场共发生了 3 156 起跑道侵入事故,其中,飞行员失误占 56%,管制员操作失误占 26%,车辆/行人失误占 18%,据此,其主导性排序如表 1 所示。

表 1 主导性排序表  
Table 1 Dominance ranked list

因素	权重/%	排序
飞行员	56	1
管制员	26	2
车辆/行人	18	3

从表 1 可以看出:1999~2007 年,美国 450 家管制机场由于飞行员失误所导致的跑道侵入事件发生占主导。由于不同年份间引起跑道侵入的人为因素的主导性不同,每次计算都要对各因素的主导性进行排序。

#### 1.4 计算威胁指数

威胁指数(Threat Index,简称 TI)的定义为

$$TI = \text{Freq} \times [v(x_1, x_2, \dots, x_n)] \quad (3)$$

式中:Freq 为发生不安全事件的次数,即发生跑道侵入的统计次数; $v(x_1, x_2, \dots, x_n)$  已经通过上述计算说明。

TI 反映了某一系统的相对安全性, TI 值越小,表示系统越安全,反之,则表示系统安全性较低。TI 可用于量化跑道侵入的严重等级,便于对不同机场的管理进行对比,也可对同一机场不同年度的管理机制进行对比。下文将通过 FAA 统计的跑道侵入的次数进行归纳统计计算,对具体年份跑道侵入的风险进行分析对比,以期安全管理者和决策者提供数据支持。

## 2 实例说明

### 2.1 数据处理

为了计算 TI 值,需要对 2000~2008 年跑道侵

入次数进行统计,并对不同因素导致的不同严重等级的跑道侵入次数做出归纳。据 FAA 统计,2000~2004 年,累计发生跑道侵入次数 1 900 次,将飞行员、管制员及车辆/行人出现失误导致的不同严重等级的跑道侵入分类统计,如表 2 所示。

表 2 2000~2004 年跑道侵入数据统计  
Table 2 FY2000~2004 runway incursion data statistics

等级	飞行员/次	管制员/次	车辆/行人/次
A/B类	123	61	33
C类	350	175	91
D类	545	299	223

2005~2008 年,累计发生跑道侵入次数 3 497 次,按不同严重等级进行分类统计,如表 3 所示。

表 3 2005~2008 年跑道侵入数据统计  
Table 3 FY2005~2008 runway incursion data statistics

等级	飞行员/次	管制员/次	车辆/行人/次
A/B类	49	49	12
C类	632	391	311
D类	1 375	85	593

根据式(2),分别计算由飞行员、管制员及车辆/行人失误所引起的不同等级跑道侵入的概率,以飞行员失误为例进行说明。例如,在 2000~2004 年,由于飞行员失误导致发生 A/B 类跑道侵入次数为 123 次( $x_{ij}$ ),发生 A/B 类跑道侵入总次数为 217 次( $x_j^*$ ),则

$$v_j(x_{ij}) = x_{ij} / x_j^* = 123 / 217 = 0.57$$

即由飞行员失误所引发的 A/B 类跑道侵入的概率为 0.57。

同理可得其他因素失误下的概率值,并将其排序。对 2000~2004 年各种因素的主导性进行排序,如表 4 所示。

表 4 2000~2004 年主导性排序表  
Table 4 FY2000~2004 dominance ranked list

因素	权重/%	排序
飞行员	54	1
管制员	28	2
车辆/行人	18	3

对 2005~2008 年各种因素的主导性进行排序,如表 5 所示。

表 5 2005~2008 年主导性排序表  
Table 5 FY2005~2008 dominance ranked list

因素	权重/%	排序
飞行员	58	1
车辆/行人	26	2
管制员	16	3

根据式(3)计算 TI 值。以 2000~2004 年 A/B 类跑道侵入发生的 TI 值为例:

$$\begin{aligned}
 TI &= \text{Freq} \times [v(x_1, \dots, x_n)] \\
 &= 1\,900 \times (0.54 \times 0.57 + 0.28 \times 0.28 + \\
 &\quad 0.18 \times 0.19) \\
 &= 798.76
 \end{aligned}$$

得到不同等级跑道侵入事件的 TI 计算结果如表 6~表 7 所示。

表 6 2000~2004 年 TI 计算结果  
Table 6 FY2000~2004 calculation result of TI

等级	Freq	飞行员	管制员	车辆/行人	TI
A/B类	1 900	0.57	0.28	0.15	798.76
C类	1 900	0.57	0.28	0.15	798.76
D类	1 900	0.51	0.28	0.21	744.04

表 7 2005~2008 年 TI 计算结果  
Table 7 FY2005~2008 calculation result of TI

等级	Freq	飞行员	车辆/行人	管制员	TI
A/B类	3 497	0.44	0.12	0.44	1 247.72
C类	3 497	0.47	0.23	0.30	1 330.25
D类	3 497	0.67	0.29	0.04	1 644.99

## 2.2 结果分析

通过对比表 2~表 3 及表 6~表 7,可以看出:

(1) 2000~2004 年和 2005~2008 年,由于飞行员失误所导致的跑道侵入次数有增无减且占有较大比重,其可能的原因包括:飞行员飞行前或进近前准备不充分;飞行员正确复诵管制员的指令,但并没有按指令操作;飞行员未注意到相关的许可界限,混淆关键的标志信息;飞行员错误地接受了管制员给另一架航空器的指令。

(2) 相比之下,由于管制员失误所导致的跑道侵入次数有所下降(C类跑道侵入除外),近年来,对于管制员安全意识的培训越来越多,但管制员失误仍未能避免。例如,管制员短暂遗忘一架航空

器、车辆、一项或一次跑道关闭,可能出现错误的指令;未进行正确的协调等,上述失误都是在实际工作中,特别是工作负荷较大时,不可避免的管制员差错。

(3) 由于车辆/行人差错所引起的 A/B 类跑道侵入相对较少,而 C 类和 D 类跑道侵入较多,其原因是在地面活动中,车辆/行人的机动性较强。车辆/行人差错的原因可能有:未经允许进入机动区或飞行区的车辆/行人;经过允许进入机动区或飞行区后指示其进行短时间停留,并且回复了指令,但依然停留在跑道。

(4) 随着飞行流量的增大,A/B 类和 C 类跑道侵入的 TI 值有所增加,且 D 类跑道侵入的 TI 值急剧上升。表明美国民航局在尽力避免较为严重的 A/B 类跑道侵入的同时,却忽视了对 D 类跑道侵入的把控,导致机场系统的安全性减弱。这一现象也可以理解为在安全裕度较大的情况下,飞行员、管制员及车辆/行人的警惕性下降,失误率增加。

(5) 仅以跑道侵入事件发生的次数来评判某一机场管理制度的好坏及从业人员业务技能的好坏并不合理。随着飞行流量的增多,2000~2004 年发生跑道侵入事件的次数远小于 2005~2008 年,但与 D 类跑道侵入相比,A/B 类和 C 类跑道侵入的 TI 值增加较小,由于 A/B 类和 C 类跑道侵入的危害性较大,可以认为 2005~2008 年民航跑道系统的安全性较 2000~2004 年好。

综上所述,本文认为在实际工作中,不论工作负荷大小,人为差错都是不可避免的,但是必要的预防措施不可缺少,应该注意以下四个方面:

(1) 在坚决杜绝 A/B 类跑道侵入发生的同时,尽力避免 C 类、D 类跑道侵入的发生。

(2) 需要对飞行员、管制员及车辆/行人分别进行对应岗位业务技能的教育培训,加强对违规操作的惩处力度。

(3) 由于飞行员失误是跑道侵入事故发生的主要原因,地面管制中应确保飞行员准确接受了每一条指令,对道面环境及机场标志标识有足够的认识。

(4) 加强飞行员与管制员之间的协调,避免高负荷工作时出现复杂和不正确的通话与指令。

### 3 结 论

本文采用多重属性风险评估模型可为跑道系统提供通用的跑道侵入风险评估方法。该方法可通过输入数据进行评估计算,使管理者得到所需的量化安全信息,为安全管理提供理论指导,对未来的安全工作具有一定的指导意义。

引起跑道侵入的因素多种多样,通常某一机场跑道侵入的发生是多种因素共同作用的结果,各种因素发生的时间、影响程度等存在相互关系,在进行跑道侵入风险评估时,应考虑各种影响因素之间的相互耦合。因此,引起跑道侵入的各因素之间的相互关系是未来研究跑道侵入风险评估的重要方面。

#### 参考文献

- [1] 罗军,林雪宁. 基于模糊集和改进 TOPSIS 方法的跑道侵入风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(12): 116-121.  
Luo Jun, Lin Xuening. Runway incursion risk assessment based on fuzzy sets theory and improved TOPSIS method [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(12): 116-121. (in Chinese)
- [2] 许桂梅,黄圣国. 基于人因可靠性的跑道侵入风险定量分析研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(19): 4715-4719.  
Xu Guimei, Huang Shengguo. Runway incursion risk assessment model based on HRA[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(19): 4715-4719. (in Chinese)
- [3] 唐欣欣,罗帆. 基于灰色聚类的机场跑道侵入人为风险综合评价[J]. 电子科技大学学报: 社科版, 2015, 17(2): 27-33.  
Tang Xinxin, Luo Fan. Human risk assessment of the airport runway incursion based on the grey clustering [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2015, 17(2): 27-33. (in Chinese)
- [4] Janic M. An assessment of risk and safety in civil aviation [J]. Journal of Air Transport Management, 2000, 6(1): 43-50.
- [5] Dohyun Kim, Hanmo Yang. Evaluation of the risk frequency for hazards of runway incursion in Korea[J]. Journal of Air Transport Management, 2012, 23(7): 31-35.
- [6] Ellen C Rogerson, James H Lambert. Prioritizing risks via several expert perspectives with application to runway safety[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 103(4): 22-34.
- [7] Kim M C, Seong P H, Hollnagel E. A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(2): 191-199.
- [8] Myrtoke, Zoen, Chrisk, et al. A fuzzy modeling of application CREAM methodology for human reliability analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(2): 706-716.
- [9] 刘艳辉,刘传正,唐灿,等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 92-97.  
Liu Yanhui, Liu Chuangzheng, Tang Can, et al. CF-based multi-factor overlay method to determine weights of the factors for geo-hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 92-97. (in Chinese)
- [10] Edwards W. How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1977, 7(5): 326-340.
- [11] 曹秀英,梁静国. 基于粗集理论的属性权重确定方法[J]. 中国管理科学, 2002, 10(5): 98-100.  
Cao Xiuying, Liang Jingguo. The method of ascertaining attribute weight based on rough sets theory [J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(5): 98-100. (in Chinese)
- [12] Kim Y M, Kim C K, Lee J C. Rough set algorithm for crack category determination of reinforced concrete structures[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(3): 202-211.

#### 作者简介:

罗军(1970—),男,博士,教授。主要研究方向:空中交通管理、交通运输规划与管理。

李淼苗(1990—),女,硕士研究生。主要研究方向:空中交通管理、交通运输规划与管理。

(编辑:马文静)