

基于人因可靠性的跑道侵入风险定量分析研究

许桂梅 黄圣国*

(南京航空航天大学民航学院, 南京 210016)

摘要 将认知可靠性与失误分析(Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM)方法应用于跑道侵入风险评估。首先,分析了跑道侵入定义,在此基础上将跑道侵入按失误类型分为运行失误、飞行员偏差和车辆驾驶员偏差三种;其次,提出了一种跑道侵入风险评估的新方法,构建了基于人的可靠性的跑道侵入风险评估模型;最后,论述了模型中参数的计算方法,应用CREAM方法分别计算了飞行员、空管员以及车辆驾驶员在预防跑道侵入方面的失误概率。应用实例说明了本模型的合理性和可行性。

关键词 机场跑道 风险评估 人的可靠性 跑道侵入

中图分类号 V328.2; **文献标志码** A

为了改善跑道安全,近年来国际民航组织正着手解决跑道侵入问题。跑道侵入是一种严重影响机场安全,容易导致灾难性碰撞和人员伤亡事故的不安全事件类型。世界上除9.11外最惨重航空事故的原因就是跑道侵入。1977年,在西班牙特纳里夫,2架满载乘客的B747飞机在一条浓雾笼罩的跑道上准备起飞时相撞,夺走了583名乘客和机组成员的生命。跑道侵入是一个普遍的问题,每个机场都存在跑道侵入的风险,而且随着交通量的增长,跑道侵入事件也将不断增加。根据加拿大运输部的一项研究,一个机场的交通量增加20%将使跑道侵入可能性增大140%^[1]。跑道侵入已经成为各国民航组织急需解决的安全问题。因此,为了防止发生可能引起事故的跑道侵入事件,需对跑道侵入风险进行管理和评估。科学合理的风险评估便于有针对性地查找跑道运行的缺陷,提高其安全管理水平。

Janic^[2]通过分析历年的航空事故,找出引发事故的因素,并采用了不同方法评价民航系统的安全性。Lee^[3]将模糊数学方法、危险程度分析原理等综合起来,建立量化模型,并用实例证明了模型的有效性。孙瑞山^[4]等基于人-机-环境系统工程理论,建立了民航安全评估体系,并以机队隐患指数、固有危险度、公司隐患指数和公司管理隐患系数为指标确定系统的安全状态。马国忠^[5]等运用多层次模糊评估方法建立了民航系统风险指标体系和评估模型,并对民航系统的安全度进行了研究。张元^[6]利用指数权重的概念,通过分析风险的可能性和严重性,实现了对民航安全风险进行定量评价的目的。纵观国内外的相关研究,大多侧重于研究民航系统的整体安全程度,而对于跑道侵入不安全事件的风险评估研究较少。针对这一问题,本文在参考国外跑道侵入定义和失误类型的基础上,尝试构建了基于人的可靠性的跑道侵入风险评估模型。

1 风险评估模型回顾

目前,民航界常用的风险评估模型大致可分为两类:①风险分析方法;②综合风险评估法。

风险分析方法是评价复杂系统风险的一种方

2010年4月9日收到 863计划(2006AA12A108)资助
第一作者简介:许桂梅(1980—),女,博士生,研究方向:交通运输规划与管理。E-mail:xgm2000@126.com。

*通信作者简介:黄圣国(1941—),男,教授,研究方向:交通运输规划与管理、交通运输信息工程与控制。E-mail:huangsg@nuaa.edu.cn。

法,主要包括初步危险分析(Preliminary Hazard Analysis, PHA)、故障树分析(FTA)、事件树分析(Event Tree Analysis, ETA)等一系列技术。风险分析法需要了解组成系统各元素之间的相互作用,分析基本元素的可靠性,并根据逻辑关系确定发生危险或错误的概率,但是实际发生危险或错误是一种小概率事件,确定其发生概率相当困难。

综合风险评估法是综合系统各方面因素,客观、公正的对系统风险进行全面评价的一种方法。主要包括模糊综合评价法、灰色评价法等。综合评价法需要清楚了解系统各种影响因素,从而构建出综合评价指标体系,但是实际上影响系统的因素很多,因素之间相互关系复杂,难以区分主要因素和次要因素,因而要构建出综合评价所需的指标体系是相当困难的。

本文提出的跑道侵入风险评估模型,从飞行员、空管员和车辆驾驶员在跑道运行中的可靠性角度来评估跑道侵入风险,并不需要分析跑道侵入的各种影响因素。

2 跑道侵入定义及失误类型

目前,跑道侵入尚未形成一个统一的定义。

ICAO 将跑道侵入定义为:“在机场发生的任何航空器、车辆或人员误入指定用于航空器着陆和起飞的地面保护区的情况。”^[7]

FAA 把跑道侵入定义为:在机场跑道环境内涉及地面航空器、车辆、人员、或物体对正在起飞、准备起飞、正在着陆、或准备着陆的航空器产生碰撞危险或导致丧失所需间隔的所有事件。^[8]

FAA 按失误类型把跑道侵入分为运行失误、飞行员偏差、车辆/行人偏差 3 种类型:

1) 运行失误(OE)是一种空中交通管制员(ATC)的行为,导致:a. 两架或多架航空器之间,或航空器与障碍物(障碍物包括跑道上的车辆、设备和人员)之间低于所需最低间隔。b. 航空器在对航空器关闭的跑道上着陆或起飞。

2) 飞行员偏差(PD)是一种飞行员违反联邦航

空规章的行为。例如:飞行员在按照批准航路进入机场进出点时,没有遵守空中交通管制关于禁止飞越使用中的跑道的指令。

3) 车辆或行人偏差(VPD)包括车辆、行人和其他物体未经空中交通管制批准,进入或在跑道活动区域运动,干扰航空器的运行。

从以上分类可以看出,跑道侵入基本是由飞行员、空管员和车辆/行人三者失误引起的。

3 跑道侵入风险评估模型

3.1 模型的构建

墨菲定律指出:“凡是有可能搞错的地方,一定会有人搞错,而且是以最坏的方式发生在最不利时机。”这说明了产生人为失误的必然性。而跑道侵入正是一种人为失误的不安全事件类型。哪怕训练水平再高,安全文化再好,飞行员、空管员和车辆驾驶员还是会偶尔出错。因此,进行跑道侵入风险评估应重点考虑人为失误概率。

假定飞行员、空管员和车辆驾驶员中有一方发生失误时,跑道侵入都有可能发生。因此可得到下式:

$$Cr = W_1P_1 + W_2P_2 + W_3P_3 \quad (1)$$

式(1)中: Cr 表示跑道侵入风险; $W_i, i=1,2,3$ 表示权重; $P_i, i=1,2,3$ 分别表示空管员、飞行员和车辆驾驶员失误概率。

模型中 W_i 和 P_i 的计算是难点,也是决定模型是否可行的关键,下面将分别简要论述计算 W_i 和 P_i 的方法。

3.2 模型中 W_i 的计算

W_i 可以根据历年跑道侵入统计数据来确定。

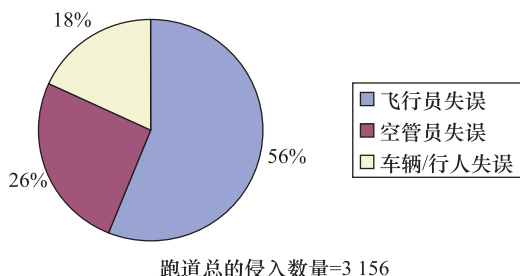


图1 1999—2007 按失误类型分类的跑道侵入不安全事件比例分配

例如:如图 1 所示,在 1999 财年到 2007 财年之间,美国具备空管塔台的约 450 家机场共计发生了 3 156 起跑道侵入事故。其中,飞行员失误占 56%,空管员操作失误占 26%,车辆/行人失误占 18%。那么按照此数据, W_1 取值就可以定为 0.56, W_2 取值可以定为 0.26, W_3 取值可以定为 0.18。

这种确定权重的方法比较简单、直接。当然,还有许多数学方法来确定权重,如层次分析法等。总之,确定权重的方法很多,可以根据具体情况来选择。

3.3 模型中 P_i 的计算

如何准确客观评价飞行员、管制员和车辆驾驶员失误是跑道侵入风险评估的难点问题。而人的可靠性分析(HRA)正是以分析、预测和减少人的失误为研究核心,对人的可靠性进行定性与定量评价的一门应用学科。因此,上述模型中的 P_i 可以按照 HRA 方法来计算。

目前,常用的人的可靠性方法是第二代 HRA 方法中的认知可靠性与失误分析方法(CREAM,Cognitive Reliability and Error Analysis Method)。CREAM 方法建立了自己独特的认知模型和分析技术。其认知模型称为 COCOM 模型(Contextual Control Model),它构成了 CREAM 方法的基础^[9]。该模型把人的行为按认知功能分为四类,即观察(Observation)、解释(Interpretation)、计划(Planning)、执行(Execution)。人的行为是在现实的环境背景下按一定的预期目的和计划进行,人又可以根据环境背景反馈的信息随时调整自己的行为,这是一个反复交互循环的过程。在 COCOM 模型中,环境背景用控制模式(Control model)来描述,共有四种,即混乱的(Scrambled)、机会的(Opportunistic)、战术的(Tactical)、战略的(Strategic)。

CREAM 便于定量分析,且提供通用的人因数据,因此可根据飞行员、空管员和车辆驾驶员工作的特点,具体分析后选择使用 CREAM 方法来计算上述模型中的 P_i 。CREAM 预测分析的详细步骤参见文献[10]。

3.4 模型特点分析

上述模型具有以下特点:

① 从人的可靠性出发,摆脱了因素众多相互关系混乱的困扰,抓住了导致跑道侵入的关键要因,建模思路清晰;

② 模型结构简单,易于实现;

③ 模型有较强的适应性,可根据人员失误变化对模型进行调整,如进行安全管理后,车辆驾驶员基本不引起跑道侵入事件的发生,则模型变为 $Cr = W_1P_1 + W_2P_2$ 。

4 实例分析

针对某机场的跑道侵入事件,采用本文提出的跑道侵入风险模型来评估该机场跑道侵入风险大小。

4.1 采用 CREAM 方法估算飞行员、管制员和车辆驾驶员的失误概率

下面以空管员为例来说明采用 CREAM 方法计算人的失误率的过程。首先进行任务分析,也就是建立管制员预防跑道侵入的操作步骤和事件序列。根据管制工作操作程序,确定管制员预防跑道侵入的基本流程:①监视跑道和滑行道动态;②与飞行员和车辆驾驶员之间保持通信;③判断潜在跑道侵入危险;④形成调配预案;⑤发布指令调配冲突。然后,识别每项步骤所需的认知活动,并确定每项步骤中的认知活动所对应的认知功能,见表 1 所示。

表 1 管制员预防跑道侵入活动所对应的认知行为和认知功能

序列	子任务	认知行为	观察	解释	计划
1	监视跑道和滑行道动态	监视	◆	◆	
2	保持通信	保持			◆
3	判断潜在跑道侵入危险	评估		◆	◆
4	形成调配预案	计划			◆
5	发布指令调配冲突	通信			

表 2 管制员预防跑道侵入过程最可能的认知功能失效

序列	子任务	认知行为	失效模式
1	监视跑道和滑行道动态	监视	O2
2	保持通信	保持	E5
3	判断潜在跑道侵入危险	评估	P2
4	形成调配预案	计划	P2
5	发布指令调配冲突	通信	E3

由于认知行为可能与多个功能失效相关,必须根据管制工作实际,确定每个认知行为对应的一个最可能的认知功能失效模式,见表2所示。

在明确最有可能发生的认知失效后,可根据认知功能失效模式与失效概率表查到对应的基本失效概率,结果见表3所示。

表3 基本失效概率

序列	子任务	失效模式	认知功能基本失效概率(CFP)
1	监视跑道和滑行道动态	O2	7.0×10^{-2}
2	保持通信	E5	3.0×10^{-2}
3	判断潜在跑道侵入危险	P2	1.0×10^{-2}
4	形成调配预案	P2	1.0×10^{-2}
5	发布指令调配冲突	E3	5.0×10^{-4}

表4 CPCs 值与权重因子

CPC 名称	水平	O2	E5	P2	E3
组织的完善性	有效	1.0	1.0	1.0	1.0
工作条件	匹配	1.0	1.0	1.0	1.0
人机界面与运行支持的完善性	可容忍	1.0	1.0	1.0	1.0
规程/计划的可用性	适当	0.8	0.8	0.5	0.8
同时出现的目标数量	与人的当前能力匹配	1.0	1.0	1.0	1.0
可用时间	暂时不充分	1.0	1.0	1.0	1.0
值班时间区	白天(调整)	1.0	1.0	1.0	1.0
培训和经验的充分性	充分,经验有限	1.0	1.0	1.0	1.0
班组人员的合作质量	有效	1.0	1.0	1.0	1.0
CPC 的总影响	0.8	0.8	0.5	0.8	

表5 修正后的 CFP

序列	子任务	实效模式	认知功能基本失效概率(CFP)	权重因子	修正后的 CFP
1	监视跑道和滑行道动态	O2	7.0×10^{-2}	0.8	5.6×10^{-2}
2	保持通信	E5	3.0×10^{-2}	0.8	2.4×10^{-2}
3	判断潜在跑道侵入危险	P2	1.0×10^{-2}	0.5	5.0×10^{-3}
4	形成调配预案	P2	1.0×10^{-2}	0.5	5.0×10^{-3}
5	发布指令调配冲突	E3	5.0×10^{-2}	0.8	4.0×10^{-4}

通过实地调研,访谈管制员以及问卷调查等方式评估共同行为条件(Common Performance Conditions, CPCs),确定 CPCs 的取值,如表4所示。

根据确定的 CPCs 修正基本失效概率,如表5所示。

根据管制员预防跑道侵入事件序列,得到管制员预防跑道侵入事件失误概率的计算公式:

$$P_{yfl} = 1 - (1 - CFP_1)(1 - CFP_2)(1 - CFP_3)(1 - CFP_4)(1 - CFP_5)。$$

上式中 P_{yfl} 为完成单个预防跑道侵入流程的失误概率,将表5中 CFP 带入上式可得:

$$P_{yfl} = 1 - (1 - 5.6 \times 10^{-2})(1 - 2.4 \times 10^{-2})(1 - 5.0 \times 10^{-3})(1 - 5.0 \times 10^{-3})(1 - 4.0 \times 10^{-4}) = 8.8 \times 10^{-2}。$$

通过调研发现,管制员平均每天要完成2到3个这样的流程。这些流程之间是并联关系,本文取2个流程,则 $P_1 = 7.74 \times 10^{-3}$ 。

同理可计算出飞行员和车辆驾驶员预防跑道侵入事件的失误概率分别为 $P_2 = 4.76 \times 10^{-2}$, $P_3 = 6.4 \times 10^{-3}$ 。

4.2 应用本文提出的模型计算跑道侵入风险率

模型中的权重按跑道侵入的历史数据来确定,则取 $W_1 = 0.26$, $W_2 = 0.56$, $W_3 = 0.18$ 。

有了 P_1 、 P_2 和 P_3 后根据式(1)可计算得到该机场跑道侵入风险率为:

$$C_r = W_1P_1 + W_2P_2 + W_3P_3 = 0.26 \times 7.74 \times 10^{-3} + 0.56 \times 4.76 \times 10^{-2} + 0.18 \times 6.4 \times 10^{-3} = 2.98 \times 10^{-2}。$$

这个数值远远大于该机场历年实际发生的跑道侵入事件率。这表明机场安全管理不仅要重视实际发生的跑道侵入事件,更要重视机场潜在的跑道侵入风险,这样才能防患未然,减少跑道侵入事件的发生。

5 结束语

跑道侵入是一类不容忽视的安全问题。在目前中国民航运输量急剧增加的情况下,对中国民用机场跑道侵入风险进行管理和评估,防止和减少跑

道侵入不安全事件的发生,已成为中国民航迫在眉睫的任务。本文在参考国外跑道侵入定义和失误分类的基础上,建立了基于人的可靠性的跑道侵入风险评估模型,实现了跑道侵入风险的量化评估。该模型还存在许多的不足之处。如模型中 W_i 和 P_i 的计算还需要进一步的探讨和研究,这也是笔者下一步要研究的内容。

参 考 文 献

1 Transport Canada. National civil aviation safety committee sub-committee on runway incursion, Final Report. 2000

2 Janic M. An assessment of risk and safety in civil aviation. *Journal of Air Transport Management*, 2000; 6 (1): 43—50

3 Lee W K. Risk assessment modeling in aviation safety management.

Journal of Air Transport Management, 2006; 12 (5): 267—273

4 孙瑞山,刘汉辉. 航空公司安全评估理论与实践. *中国安全科学学报*, 1999; 9 (3): 69—73

5 马国忠,米文勇,刘晓东. 民航系统安全的多层次模糊评估方法. *西南交通大学学报*, 2007; 42 (1): 104—109

6 张元. 民航安全风险定量评价模型研究. *中国安全科学学报*, 2007; 17 (9): 140—144

7 ICAO. *Manual for Preventing Runway Incursion*. 2006

8 FAA. *FAA Runway Safety Report*, 2005

9 Kima M C, Seonga P H, Hollnagel E. A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006; 91:191—199

10 Myrto K, Zoe N, Chris K, *et al.* A fuzzy modeling of application CREAM methodology for human reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006; 91:706—716

Runway Incursion Risk Assessment Model Based on HRA

XU Gui-mei, HUANG Sheng-guo *

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

[Abstract] The risk of runway incursion exists objectively in airport operation and it directly influences runway safety. How to evaluate the risk of runway incursion is critical significant. By the analysis of runway incursion definition and failure type, this paper presents a risk assessment model for runway incursion based on HRA. This paper is expected to provide a new approach for risk assessment of runway incursion.

[Key words] airport runways risk assessment human reliability runway incursion