

文章编号:1005-0523(2019)02-0083-09

基于事件序列图 ESD 的跑道入侵危险性分析

李欢,夏洪山,高阳,梁的达

(南京航空航天大学民航学院,江苏南京 210016)

摘要:随着机场交通量的增大,跑道入侵事件增长迅速,对于机场的安全造成一定的影响,对跑道入侵进行危险性分析显得尤为重要。采用动态的基于事件序列图 ESD 的方法对跑道入侵进行分析,详细描述了不同跑道使用情况和管制流程下的机场跑道运行情况,研究动态因素对于系统和事故发展进程及其后果的影响。研究表明在无法消除危险源的情况下,能够及时把握场景事件的发生,能够有效避免跑道入侵事件的发生,因此为预防跑道入侵事件提供了新的思路 and 方向。

关键词:事件序列图;跑道入侵;场景事件

中图分类号:X951

文献标志码:A

我国的民航事业不断发展,机场道面运行安全面临的各种挑战不断增多,其中跑道入侵事件就是一种严重影响机场安全,容易导致人员伤亡和财产损失的不安全事件。跑道入侵是指在机场发生的任何涉及错误的出现在用于飞机起飞和降落的保护区表面的飞机,车辆以及行人的事件,每增加 20% 的空中交通流量,发生跑道入侵风险就有可能增加 140%。跑道入侵事件值得引起广泛的关注和更好的解决。

在跑道入侵方面的研究国外学者研究的比较早,ICAO 对跑道入侵从安全方面进行研究,设计机场跑道安全软件,包括飞行员、管制员以及机场运营人员的意见进行研究^[1]。Bill Clarke 曾在 2005 年出版的《防止跑道入侵》一书中,采用了“事前—期间—事后”的方法进行分类,找出 10 个方面可能促使跑道入侵事件发生的原因,并提出了改进的建议和措施^[2]。Yu H C 采用 SHELL 模型对跑道入侵的人为因素进行分析,并用专家打分法确定权重^[3]。Stroeve S H, Blom H A P 等人基于多 agent 模型,运用蒙特卡罗模拟对与跑道入侵相关的安全场景进行了模拟,证明该方法是一种可行的系统事故评估方法^[4]。上述学者主要是强调了人为因素在跑道入侵的重要影响,忽略了事故场景对于事故发生的影响。

国内方面,霍志勤通过建立案例和规则的推力模型,给出融合策略和算例分析分析跑道入侵的原因^[5],但是该方法缺乏对场景事件的描述和分析。林雪宁等采用高斯分布和贝叶斯网络相结合的方法,确定导致跑道入侵的因素^[6],但是对于影响因素的分析是通过专家咨询进行的,较为片面和主观,缺乏科学性。许桂敏利用人的认知可靠性和失误分析法(CREAM)对跑道入侵事件中的飞行员和管制员的失误概率进行分析^[7],但是没有考虑到其他因素的相互交叉影响。于影霞等人运用事故树的分析方法对公路运输中的安全隐患进行分析,缺乏动态分析和评估^[8]。

上述学者关于跑道入侵的研究已经很深入。但是针对跑道入侵危险分析着重强调人为因素的影响,并且大多采用一些静态的故障树(FT)、事件树(ET)和危险性与可操作性分析(HAZOP)等方法进行跑道入侵危险的研究,忽略了跑道入侵事件的发生是在一个相互交叉,动态变化的一个场景。针对上述存在的一些缺陷,本文提出基于动态的事件序列图(ESD)的方法,着重分析跑道入侵事件发生的场景事件,从分考虑发生

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家社会科学基金项目(15BJ104)

作者简介:李欢(1994—),女,硕士研究生,研究方向为机场运行安全。

通讯作者:夏洪山(1952—),男,教授,研究方向为机场运行安全。

过程的存在的可能性,较为完成的体现出跑道入侵事件的过程,对后续的风险评价提供良好的基础,同时克服了传统的故障树存在的缺陷。

1 基于主逻辑图(MLD)的初因事件识别

对于像跑道入侵这类复杂的系统,尤其是系统中的各个子系统之间又相互关联,如想对整个系统提出模型进行分析是不易的。本文采用一种相对简化处理的主逻辑图(MLD)模型化技术,可以对复杂系统进行分解,生成系统安全风险模型,快速确定事故的初因事件。

国内学者在对复杂工程技术系统分析中,已经运用这种分析方法。司悦彤在研究尾矿坝溃坝中利用主逻辑图将系统分解成子系统,建立分层次的模型^[9]。

运用 MLD 方法对跑道入侵事件进行分析,确定其初始事件,为后续的分析做准备。利用主逻辑图分析跑道事件,需按照主逻辑图建模的一般方法,将对象看成一个复杂系统,考虑该系统的功能,及完成该功能的系统、子系统等一层层向下分析。从功能的层面上来说,造成跑道入侵事件的最直接的原因是一些人的不安全行为和物的不安全状态,这里主要是机场车辆或行人的差错以及管制员和飞行员的差错,经 2008—2011 年欧美和中国的数据统计分析,得出我国跑道入侵的主要原因是车辆或行人的差错,而欧美跑道入侵的主要原因是飞行员的差错^[9]。同时从系统角度分析,这些直接原因的后面有更深层次的间接原因,主要从人-机-环-管四个角度分析。具体的主逻辑图模型如图 1 所示。

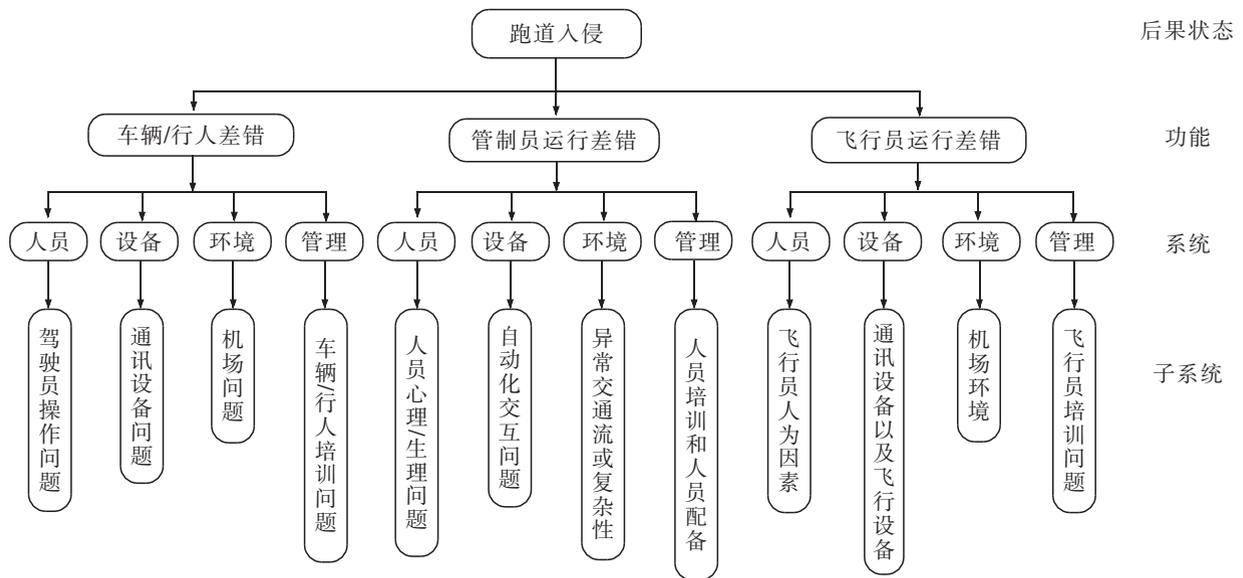


图 1 跑道入侵的主逻辑图

Fig.1 Main logic diagram of runway incursion

根据以上主逻辑图的分析,得出的初因事件为:车辆驾驶员操作失误、通讯设备故障、机场问题、机场车辆或行人以及管制员和飞行员在培训上存在的问题、管制人员的失误、管制设备的故障和缺陷、机场交通流复杂、飞行人员的人为因素、飞行员与管制员等之间的通讯问题。

2 ESD 场景事件的描述与优势

事件序列图(event sequence diagram,ESD)是一种面向事故场景的模拟方法,以时间为基本研究对象,是事故场景的直观体现^[10]。跑道入侵事件是个复杂的系统,在这个系统中任何一个环节的变化可能会导致不同的结果,用 ESD 这个可以体现场景动态变化的方法可以很好的找出跑道运行过程中的薄弱环节和需要改进的地方。ESD 方法可以帮助鉴别和构造事件的时间序列,有针对性的处理下述动态特征。包括以下几个方面:

- 1) 事件发生时间:同一事件在不同时间发生产生不同的事故场景;
- 2) 事件发生顺序:事件发生顺序的不同组合产生不同的事故场景;
- 3) 过程变量相关性:过程变量可能决定着事件的发生与否。

一般地,ESD 采用事件、条件、逻辑门、过程参数、限制和关联规则等要素来建立事件间的相互影响和作用,描述故障事件发生并导致后果的可能发展过程。事件是指分析人员可观察到的任何物理现象。条件是指控制事件向不同的方向发展的规则,包括时间条件和过程变量条件。逻辑门通常包括逻辑与门和逻辑或门。过程参数是指发生在事件序列时间内的一些影响系统的物理参数。限制是指一个事件或过程发生的时间内与其他的事件序列存在竞争的关系。关联规则描述个系统内部之间存在的相互影响和交互,是 ESD 动态模拟能力的重要特征。为了进行直观的描述,下面通过表 1 解释各个图形符号所代表的含义。

表 1 事件类型及图形符号含义
Tab.1 Event type and graphical symbol and meaning

事件类型	图形表示	含义
注释		对事件序列发展情况进行补充说明。
初始事件		推演后出续一系列活动发生发展的启动事件
环节事件		中间事件,可服从某一分布或根据要求发生。
终止事件		一个事件序列的终止点,表示某种后果事件或状态。
随机延迟		事故场景中某一随机时期段内无任何事件发生的情况。
时间条件		建立在确定的时间限制的基础上,根据条件是否满足产生两种结果。
物理变量开关		建立在确定的过程变量限制的基础上,根据条件是否满足条件产生两种结果
可扩展门		代替 ESD 中重复出现的事件

一般意义上的是,概率风险评价方法基于事故树、事件树等方法对事故进行分析,存在一定的缺陷。例如:

- 1) 需要各个事件的相互独立,在实际的事故中,一般引起事故的各个事件都有一定的交互和交叉。
- 2) 缺乏事件在的时间和空间上的顺序,不同的时间次序可能导致不同事故结果。
- 3) 缺乏动态的事件追踪和描述,对于事故场景缺乏最基本的描述,有时候同样的初始事件由于场景的不同可能引发不同的后果事件。

针对以上缺陷,采用具有动态场景的 ESD 跑道入侵分析模型,实现动态的基于时间的分析。

3 基于 ESD 的动态场景的危险分析

通过上述分析,得知机场跑道入侵是个复杂的系统,是由一系列相互关联的运行系统组成的,单个因素的失效并不会直接导致机场跑道入侵事件的发生,只有一系列的不安全因素相互作用才导致危险的发生,因此任何事故的发生都有一定的事件链,通过主逻辑图分析,得出影响跑道入侵的初因事件,在确定初因事件的同时,场景事件对于机场跑道入侵的影响和分析则需要着重进行研究,场景事件会随着时间以及事件发生的顺序的变化而变化,对于后果事件具有直接的影响,是决定后果事件状态的重要因素,图 2 为机场跑道事故发生的事链。

3.1 正常飞机起降的过程

飞机在机场做完所有的准备工作后,向机场塔台管制员提出滑行许可,管制员在进行一定的安排和净空后,对可以进行滑行起飞的飞机发布指令,让航空器滑行到指定的滑行道并且在对应的跑道口等待可以进入跑道指令;航空器的飞行员在得到管制员指令后要复诵指令,同时管制员接收到复诵信息后,要核实信息的内容,确保航空器已经到达指定的位置;管制员确认信息正确后对其进行应答,同意航空器进入跑道准备起飞;航空器飞行员接收到可以进入跑道的指令后继续滑行,进入跑道准备起飞;管制员发布的起飞许可同时要传达给机场机坪、滑行道等的相关的车辆和其他的航空器,防止车辆/行人和其他的航空器在不明确跑道上的情况,出现误入跑道,引发跑道入侵事件,对机场的人的生命财产产生威胁。飞机正常起飞程序如图3所示。

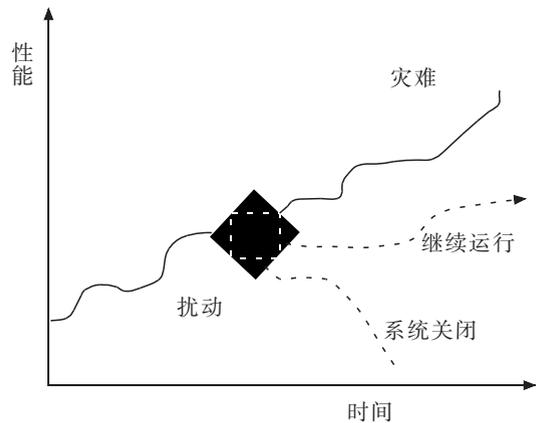


图2 机场跑道入侵事件链的发展过程
Fig.2 The development process of runway incursion incident chain

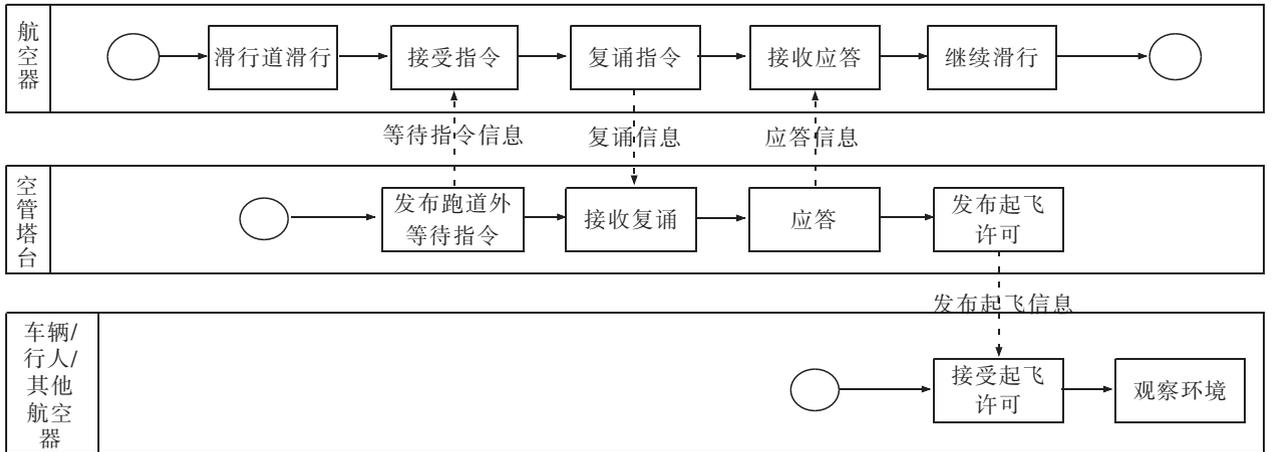


图3 飞机正常起飞程序
Fig.3 Normal take-off procedure

在这个过程中导致跑道入侵事件发生的首要原因就是在工作的人员不知飞机的确切的位置,而导致这个问题发生的原因可能有很多种,人为因素是影响跑道入侵的一大因素,例如当飞行员向塔台管制员提出起飞申请,管制员通过通讯设备向飞行员发出指令时,可能由于飞行员和管制员之间的交流不畅,没有理解对方的意图,使得飞行员出现误入正在起降的跑道,造成跑道的入侵;同时可能是管制员对于机场区域内的车辆或行人,未告知或者告知错跑道的情况,使得车辆行人误入跑道;这其中含有人为的失误和更深层次的由于组织管理缺失和不到位导致的差错问题。上述存在的人为因素在不同的事故场景中,可能会出现不同的后果,下面将着重分析这些差错在不同的场景中将会引发不同的后果事件。

3.2 基于ESD的跑道入侵事件的场景分析

可能导致跑道入侵事件的初始事件有很多,本文着重分析由于人为因素导致的跑道入侵事件,并以管制员出现的人为失误作为例子进行分析,初始事件为管制员向航空器的飞行员发出错误的指令。该系统运行期间,各个环节机场情况、飞行员、机场车辆或行人等可能产生失误信息,并因此作为事件场景分析;当管制员的失误出现后,考虑是否出现跑道入侵,如果出现则认为事故发生,如果没有出现,则认为安全。

下面采用 ESD 方法对跑道入侵的事故场景进行分析。本文描述初始事件为管制员向航空器飞行员发出错误的指令的 ESD 模型建立过程。

管制员向飞行员发出错误指令后,在信息的传递过程中会存在延时,飞行员能否接受到指令和接收到指令后的操作直接影响着后续场景事件的发生。如果飞行员没有收到指令,就接到可扩展门 A。

A 表示通讯的问题,进而描述通讯方面的场景;如果飞行员接收到管制员的指令,但是没有执行,可能是飞行员看到跑道的情况,根据自己的判断进入可扩展门 B。

B 表示机场环境的描述,这里分别描述了机场跑道布局和使用情况、机场道面标志和灯光以及跑道能见度和跑道污染物的控制的情况下可能发生的场景,飞行员可能根据机场的情况进行进一步的判断和执行;可扩展门 C。

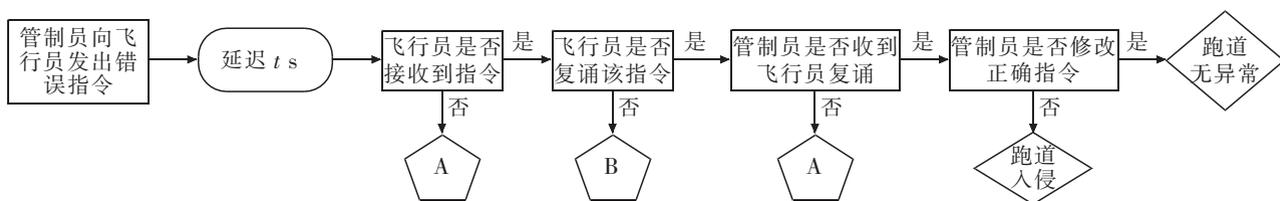
C 表示飞行员存在的问题,描述飞行员作出违规行为后所发生的场景,根据飞行员是否是有意违规,进而发生不同的事件。

D 代表可扩展门,D 描述管制员存在的问题,管制员存在犯错的可能,描述管制员的组织以及个人因素对于后果的影响。

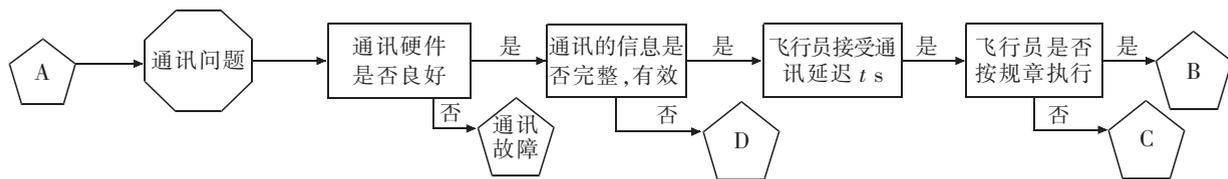
E 指的是可扩展门,E 描述机场中的车辆和行人的行为,车辆或行人可能在不了解飞机的确切位置时会出现误入跑道的情况,这里分别描述了这些可能发生的场景。

F 可扩展门,F 描述由于机场管理方面的失误造成的跑道入侵事件的发生。

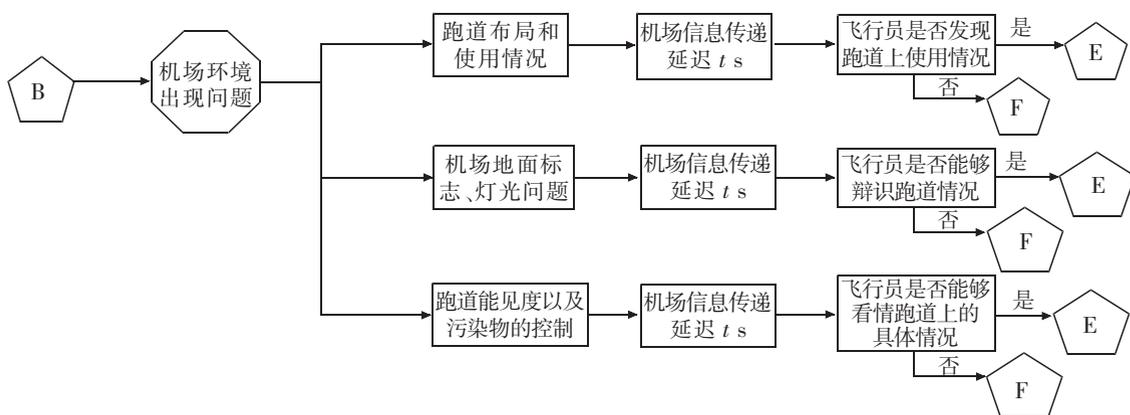
在这些场景中会有延时的出现,延时的时间不确定,延时的出现可能导致信息不畅通而出现跑道入侵事件的发生,因此延时是本系统的一个限制。各个场景事件的组合可能导致跑道入侵的发生,不同的场景事件有不同的后果。系统的 ESD 模型如图 4 所示,初因事件的不同,场景事件的不同会有事件后果,本文只是举了一个例子,其他可能的 ESD 模型本文不再给出。



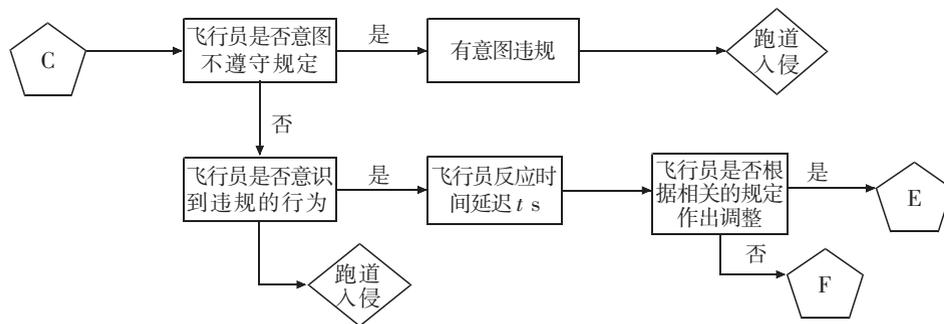
(a) 错误指令 ESD 模型建立过程



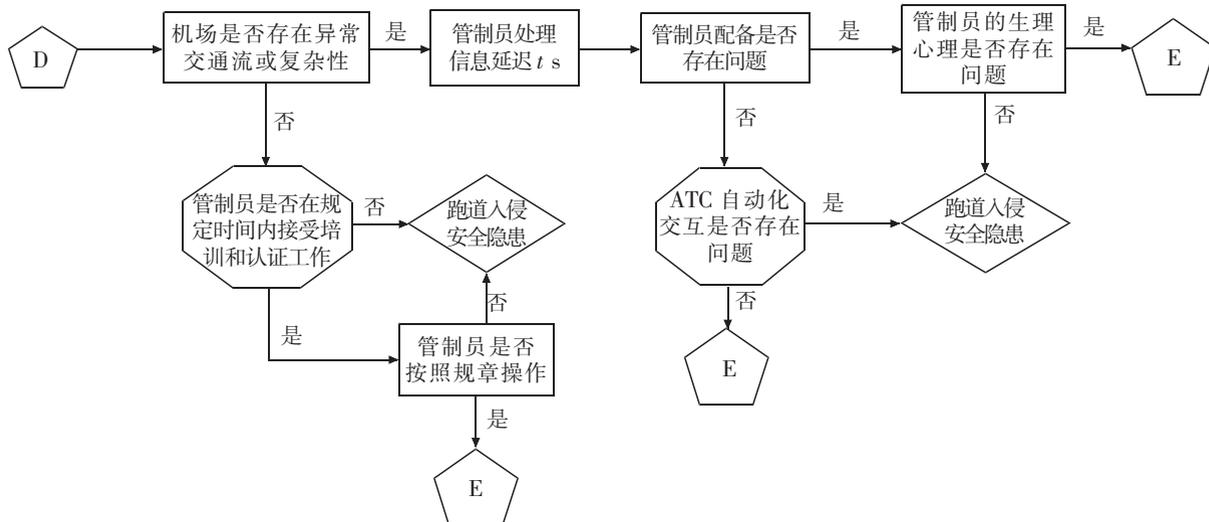
(b) 通讯问题



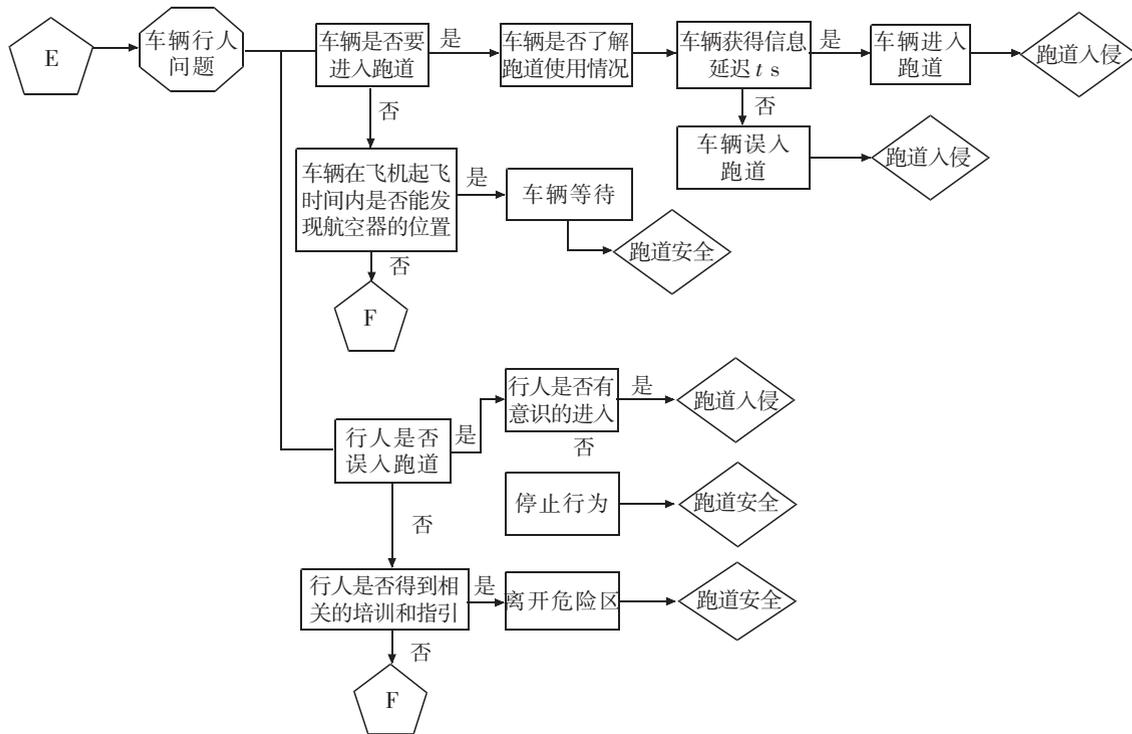
(c) 机场环境描述



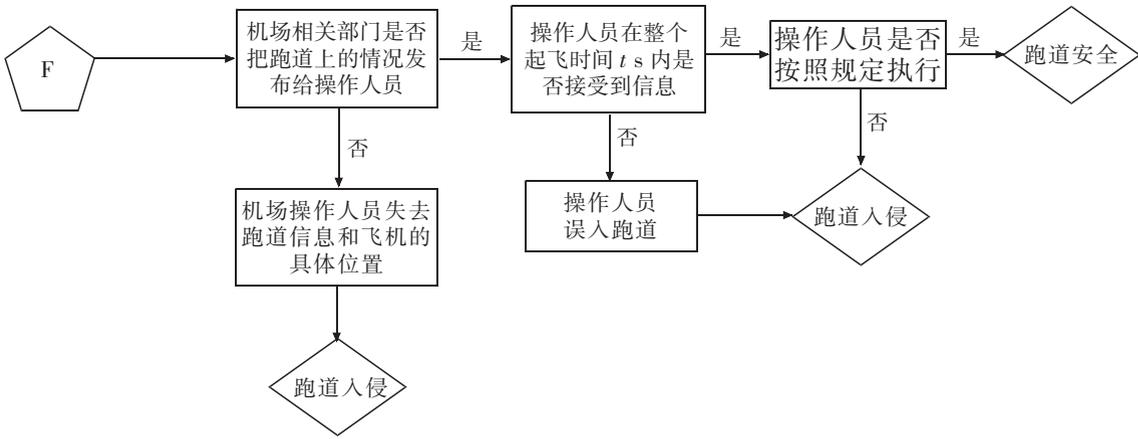
(d) 飞行员存在的问题



(e) 管制员存在的问题



(f) 车辆和行人的行为



(g) 机场管理失误

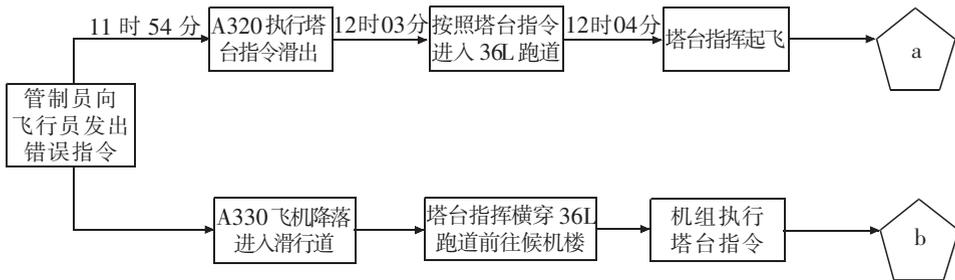
图 4 跑道入侵的 ESD 模型

Fig.4 ESD model of runway incursion

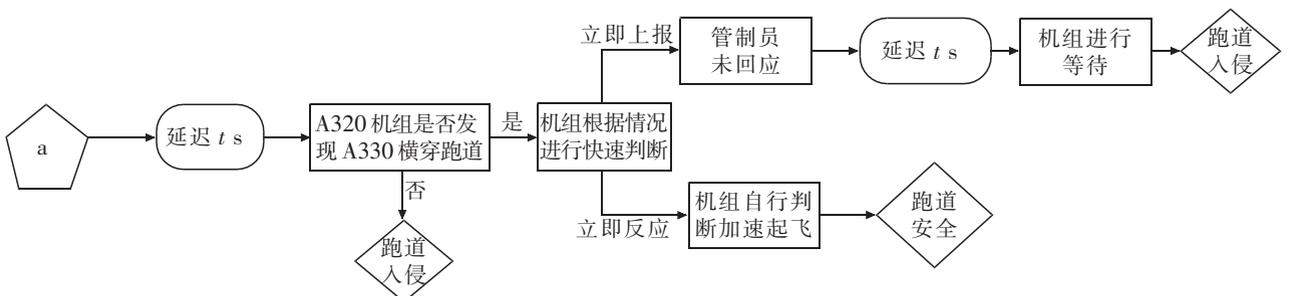
机场跑道入侵的因素从 MMEM 角度分析,主要有飞行员、管制员的不安全行为,机场导航、灯光等设备的不安全状态,机场天气、流量管制等的不利的运行环境,航空公司、机场等的管理制度缺陷;这些客观存在的不安全状态,本身并不会导致机场跑道入侵事件的发生,只有处于一个动态的变化的场景中,才可能导致不安全事件的发生。对于跑道入侵事件的预防和减少,可以基于 ESD 的动态场景分析中,控制一些重要的场景的发生。例如,上述案例中,单一的管制员的错误指令并不会导致最终的跑道入侵事件的发生,当飞行员没有按照规定的复诵程序完成,机场的工作人员没有按照规定的制度执行等一系列动态场景的叠加,才会导致机场跑道入侵事件的发生。

3.3 案例分析

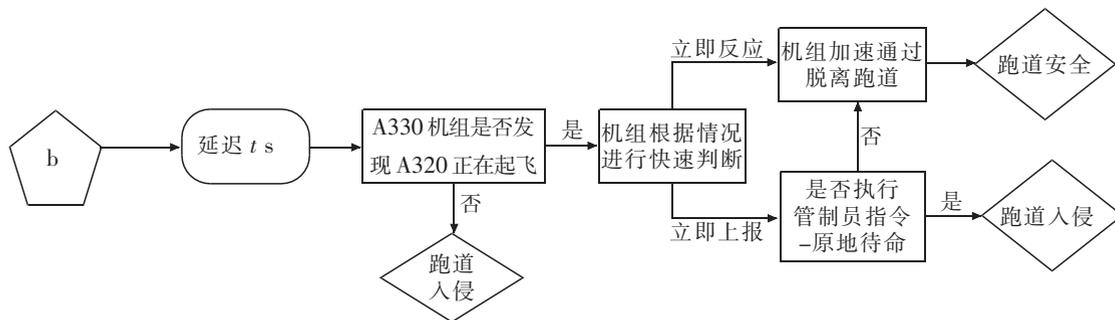
2016 年 10 月 11 日虹桥机场发生了机场跑道入侵事件,由于管制员指挥失误进而引发的两架飞机同时出现在上海虹桥机场 36L 号跑道上,在初因事件确定时,飞行员根据实际情况进行正确的处理,避免了航空事故的发生,突出了面对同样的初因事件不同的场景事件会产生不同的后果事件,图 5 用 ESD 分析方法对虹桥机场跑道入侵事件进行分析。



(a) 管理员指挥失误



(b) 东航 A320 机组成员在面对管制员指挥失误时所进行的操作



(c) 东航 A330 机组成员在面对管制员指挥失误时所进行的操作

图 5 虹桥机场跑道入侵事件过程分析图

Fig.5 Analysis chart of runway incursion event process of Hongqiao airport

上述案例用 ESD 动态分析方法研究,清晰直观地发现,在管制员既定的指挥失误的前提下,可以通过控制后续的场景事件的发生来避免后果事件的发生,在此次虹桥机场事件中,机组成员根据自身过硬的素质和丰富的经验,成功的作出及时的判断,避免事故的发生。因此从此次事故中,可以发现对于场景事件的控制,能够最大可能的避免事故的发生,场景事件具有连通初因事件和后果事件的直接作用,在以后的安全预防和控制上,着重对于场景事件控制和管理。

4 结论

ESD 是运用一种简单的方法来描述具有许多动态过程的系统。本文首先运用主逻辑图的方法找出跑道入侵的初始事件,突出了 ESD 的作用和建模,运用 ESD 方法对跑道入侵事故进行分析,探讨了以管制员的失误为初始事件的跑道入侵的演变过程,建立了跑道入侵的 ESD 模型。进一步以近期发生的虹桥机场跑道入侵事件为例,证明了通过良好的把控场景事件能够有效的预防事故的发生。

对于机场跑道事件的预防提出了一个新的思路,在不能消除所有的危险源时,尽可能的控制事故发生的场景,不同的动态场景组合会导致截然不同的后果。场景事件的提出对于以后机场跑道入侵事件的预防具有重要的意义和作用。

ESD 的方法相对于传统的事件树和事故树等方法,更简洁同时也具有大量的动态信息,可以将复杂的现实场景转化为更加容易操作和辨别的图形,更适合大型系统的动态的风险分析,同时可以结合一些定量分析为确定风险作为依据。

参考文献:

- [1] ICAO. Doc9870AN/463, Manual for preventing runway incursions[M]. International Civil Aviation Organization, 2007.
- [2] CLARKE B. Runway incursion[M]. USA: America Civil Aviation Press, 2005.
- [3] YU H C. Human risk factors associated with runway incursions[J]. Journal of Air Transport Management, 2012, 24(24): 25-30.
- [4] STROEVE S H, BLOM H A P, Bakker G J. Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation[J]. Safety Science, 2009, 47(2): 238-249.
- [5] 霍志勤, 韩松臣. 基于案例推理和规则推理融合的跑道侵入事件调查[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(7): 53-58.
- [6] 罗军, 林雪宁, 闫永刚. 基于高斯贝叶斯网络模型的跑道侵入影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 196-199.
- [7] 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.
- [8] 于影霞, 曾致桓, 龙丹. 基于事故树分析的货运驾驶员失误研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 55-62.
- [9] 司悦彤. 概率风险评估在尾矿坝溃坝中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 26-27.
- [10] 霍志勤. 跑道安全理论与务实[M]. 北京: 中国民航出版社, 2013: 250-257.

Hazard Analysis of Runway Incursion Based on Event Sequence Diagram ESD

Li Huan, Xia Hongshan, Gao Yang, Liang Dida

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Along with the increase of traffic volumes of airports, runway incursion events are increasing rapidly, which have certain influence on airport safety, so the evaluation of runway incursion hazard is very significant. This paper analyzed the runway incursion events by using the method of dynamic event sequence diagram ESD, describing the runway usage and operating conditions of the airport runway under the regulatory process and studying the influence of dynamic factors on the system and accident development process and its consequences. The research indicates that the occurrence of the scene events can be taken away in time without eliminating the danger source, which can effectively avoid the occurrence of runway incursion, so it can provide some new ideas and directions for preventing runway incursion.

Key words: event sequence diagram; runway incursion; scene event

(上接第 76 页)

Study on Aircraft Leasing Business Growth Level Index Based on Principal Component Analysis

Lin Weiwei, Zhu Jinfu, Xu Li, Zheng Wenjuan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: China's aircraft leasing business started late but has developed rapidly. This paper selected the growth data of China's aircraft leasing business from 2008 to 2016 in terms of scale, structure, speed and quality, adopted the principal component analysis method to construct the growth index of aircraft leasing business, and analyzed the reasons for the change of growth level from the internal structure of the index. The study shows that China's aircraft leasing business has an upward trend of fluctuation in general, but in 2013 it fell back due to the capital market, and then resumed rapid growth after 2014. The State Administration issued the Opinions on Accelerating the Development of Aircraft Leasing Business, which played an important role in promoting the development of the industry. And the revenue is the key factor in the growth of China's aircraft leasing business.

Key words: aircraft leasing business; growth; level index; principal component analysis