

文章编号:1674-8190(2023)01-081-09

基于ATHEANA-STPA混合方法的航空 人为因素分析

牛军锋¹,甘旭升²,魏潇龙²,王明华²

(1. 西京学院 管理技术系, 西安 710231)

(2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 传统人为因素失误分析技术(ATHEANA)由于缺乏系统化的分析方法,对不安全控制行为(UA)和迫使失误情景(EFC)的识别不充分,因此提出人为因素失误分析技术—系统理论过程分析(ATHEANA-STPA)混合方法对航空人为因素展开分析。基于人为因素失误预测技术(THERP)方法构建系统控制模型,识别UA和与其关联的致因因素;根据各类致因因素的关联性构建EFC,基于THERP提供的基础人为误差数据对UA的触发概率进行评估;基于瓦解EFC的思想制定风险管控措施,通过一起航空安全事故的分析应用验证ATHEANA-STPA混合方法的有效性。结果表明:本文提出的ATHEANA-STPA混合方法所形成的结论能够对风险管控起到更为具体的指导作用。

关键词: 安全工程技术;ATHEANA;STPA;人为因素;飞行安全

中图分类号: V328; TB553

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.09

Analysis of aviation human factors based on ATHEANA-STPA hybrid method

NIU Junfeng¹, GAN Xusheng², WEI Xiaolong², WANG Minghua²

(1. Department of Management Technology, Xijing University, Xi'an 710123, China)

(2. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Due to the lack of systematic analysis methods, the traditional a technique for human error analysis (ATHEANA) does not fully identify unsafe action (UA) and error forcing context (EFC). Therefore, a hybrid method of ATHEANA-STPA (systems-theoretic process analysis) is proposed to analyze aviation human factors. The system control model is constructed based on technique for human error rate prediction (THERP) method to identify UA and its associated causal factors. EFC is constructed according to the correlation of various causal factors. The probability of UA is evaluated based on the basic human error data provided by THERP. The risk control measures are formulated based on the idea of disintegrating EFC. Through the analysis of an aviation safety event, the effectiveness of ATHEANA-STPA method is verified. The results show that the analysis conclusion of proposed ATHEANA-STPA hybrid method can play a more specific guiding role in risk management.

Key words: safety engineering technology; ATHEANA; STPA; human factors; flight safety

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(21AGL030)

通信作者: 甘旭升, gxsh15934896556@qq.com

引用格式: 牛军锋, 甘旭升, 魏潇龙, 等. 基于ATHEANA-STPA混合方法的航空人为因素分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 81-89.

NIU Junfeng, GAN Xusheng, WEI Xiaolong, et al. Analysis of aviation human factors based on ATHEANA-STPA hybrid method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 81-89. (in Chinese)

0 引言

随着航空技术的发展,航空器的安全性能不断提升,设备可靠性得到显著改善。但随着空中飞行活动的增加,航空安全事故仍然时有发生,特别是一些重大空难事故给人们造成了极大的社会影响和损失。而通过对事故原因的分析 and 统计发现,危险致因的比例结构正在发生显著变化。20世纪50年代以来,航空事故的主要致因已经从技术层面逐步转向人为因素领域。根据航空事故的统计报告显示,70%的航空事故直接或间接与人为因素相关^[1]。21世纪以来,研究者进一步将人为因素的管控重心转向组织管理和安全文化领域^[2],做好人为因素管控已成为航空安全管理重点工作内容。

当前常用的航空事故分析方法主要有SHEL模型^[3]、Reason模型^[4]、故障树分析^[5]、故障模式与影响分析^[6]等。但这些方法均是从线性角度考虑失效部件与影响因素之间的关系,对于系统内各部件之间的影响挖掘不够。随着现代应用系统规模的增大,系统设计也不断复杂化,传统分析很难对系统模块之间的非线性特性和交互行为进行充分分析,安全防范措施有一定局限性。N. Leveson^[7]首次提出了系统理论事故建模和过程(Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes,简称STAMP)分析方法,该分析方法旨在捕捉单一组件之外的更多危险因素,包含了“人一机一环一管”各个方面;N. Leveson^[8]基于STAMP分析方法提出了系统理论过程分析(Systems-Theoretic Process Analysis,简称STPA)方法,并广泛应用于化工、核能、航空等多个领域的安全事故分析中;丛继平等^[9]使用STPA方法对空中加油“甩鞭”现象展开分析,结合仿真平台验证安全措施的有效性;赵长啸等^[10]提出了STPA-Bayes模型分析机载平视显示系统的安全性。上述方法/模型对安全事故的分析普遍适用,但对人为因素的剖析缺乏针对性,存在人为因素诱因识别不充分的现象。为充分研究人为因素在安全事故中的运行机理,多种人为因素可靠性分析(Human Reliability Analysis,简称HRA)方法被开发和使用,其中人为因素失误分析技术(A Technique for Human Error Analysis,简称ATHEANA)是较为有效和新颖的一种。国外,J. Forester等^[11]基于专家知识研究了

ATHEANA方法中定量分析的方法;R. Teresa等^[12]使用ATHEANA方法对核能发电控制中的人为因素进行研究,对量化分析的方法进行了探讨。国内,张力等^[13]对ATHEANA方法进行了介绍,并使用该方法对核电站非正常情况下的人为因素引发机制进行了分析。在航空领域,Su R E等^[14]使用ATHEANA方法对一起航空事故中的人因失误行为进行了剖析,并对失误行为触发概率进行了探讨,但其定量研究过程中仍存在准确数据难以获得的问题。此外,在基于第二代HRA的航空人为因素的研究中,认知可靠性和失误分析方法(CREAM)模型的应用较多,例如:刘继新等^[15]使用CREAM拓展法对管制人员的指挥失误概率进行分析,形成了量化的分析结论;赵振武等^[16]利用CREAM对管制员与飞行员交互的可靠性进行评价。但CREAM方法缺乏系统分析视角,存在致因因素识别不全,风险评估准确度低的问题。

从国内外研究现状来看,ATHEANA方法虽在人为因素分析中具有较强的针对性,但主要应用于核能、化工等生产领域,航空安全领域应用较少。本文综合STPA方法对系统运行过程分析的优势和ATHEANA方法对人为因素分析的针对性,提出一种基于ATHEANA-STPA混合方法;从系统控制的角度来剖析人为因素,构建人因失误情景,识别不安全行为,并构建特定情境下人为失误概率计算模型;通过一起航空安全事故验证混合方法的有效性。

1 ATHEANA方法介绍

ATHEANA方法认为人为因素失误(Human Factors Error,简称HFE)是迫使失误情景(Error Forcing Context,简称EFC)作用于人而引发的,强调HFE是非正常条件下系统状态、情景环境和人的绩效形成因子共同作用的结果^[17]。在HFE致因分析过程中,注重查找EFC的形成环境与不安全控制行为(Unsafe Action,简称UA)的作用关系,从而制定具有针对性的UA管控措施。

ATHEANA方法的分析流程主要分为两个部分,分别为HFE的识别和HFE的量化。在HFE的识别部分主要对分析情景、分析目标和范围进行定义,在定义的分析范围内开展HFE、EFC、UA

的识别和关系分析。在 HFE 的量化部分主要基于前期分析的作用关系和先验知识开展 HFE 发生的概率水平评估,从而对非正常条件下的系统工作可靠性展开评价。分析流程如图 1 所示。

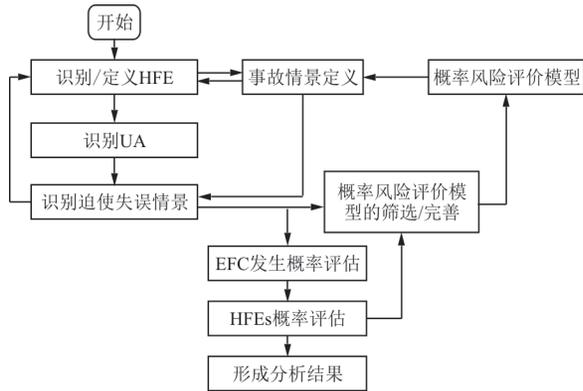


图 1 ATHEANA 方法的分析流程

Fig. 1 Analysis process of ATHEANA method

ATHEANA 方法共分为 9 个步骤^[17]。一方面,ATHEANA 方法对 UA 和危险致因的识别主要基于对 EFC 的查找,认为是 EFC 迫使班组人员产生 HFE,并引发 UA。但 ATHEANA 方法并没有进一步对绩效因子对照检查表识别的 EFC 展开关联性分析。若最后的安全预防措施忽视了事故链节点之间的关联性,则仍有可能留下安全漏洞。另一方面,ATHEANA 方法进行定量分析时需要准确的先验概率知识作为支撑,若在先验知识缺乏的情况下,定量分析则很难进行。

2 STPA 方法介绍

STPA 是基于 STAMP 模型的一种分析方法。STAMP 模型将安全问题转化为系统控制过程加以研究,通过对系统控制过程的分析识别系统运行过程中的安全约束缺陷,模型通常由安全约束、分层控制结构和过程模型 3 部分组成^[18]。STPA 方法对系统运行过程中产生的 UA 识别及其前后因果关系的追溯具有明显的优势,但其对 HFE 的分析却并不透彻,容易将其视为事故链中的简单一环,安全防范措施的制定也主要基于识别的 UA,缺乏对人为因素形成机理的分析。

3 ATHEANA-STPA 混合方法

现代航空安全事故的引发通常是系统中多个部件相互作用的结果,期间掺杂着一系列的 UA,

而每一个 UA 都会与多个人为因素发生关联。对人为因素的分析既要有 STPA 系统化的分析方法,又要有 ATHEANA 对人为因素的关联和挖掘方法,通过混合应用,将各个系统部件的薄弱环节进行关联,从而制定更为全面的管控方案。对此,本文提出 ATHEANA-STPA 混合人为因素分析方法,分析流程如图 2 所示。

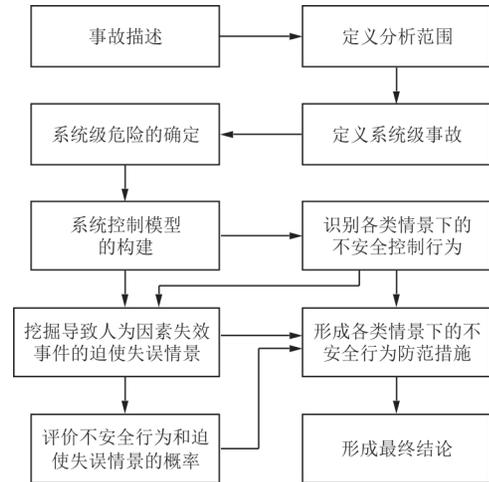


图 2 ATHEANA-STPA 混合方法分析流程

Fig. 2 Hybrid method analysis process of ATHEANA-STPA

ATHEANA-STPA 混合方法共 9 个步骤。

步骤 1:事故描述

详细审查航空安全事故发展演变的前因后果。

步骤 2:定义分析范围

明确开展此次航空安全事故分析的目标和所要研究的问题,确定所要研究问题的边界,避免研究规模过大。

步骤 3:定义系统级事故

对定义范围内可能引发的系统级事故展开分析,通常按照损失的严重程度和附带范围展开分级。

步骤 4:系统级危险的确定

结合事故背景和问题目标,对可能导致系统级事故的危险因素展开分析。“危险”可以是一种系统状态,或一组特定的环境条件,这些因素导致事故的发生^[19]。

步骤 5:系统控制模型的构建

系统控制模型的构建是为了更好地识别 UA 和 EFC,典型控制回路如图 3 所示。

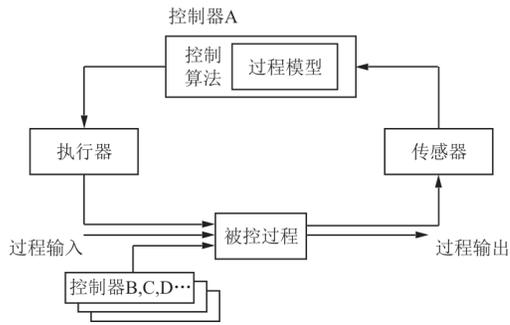


图3 典型控制回路结构

Fig. 3 Typical control loop structure

步骤6:识别各类情景下的UA

借助构建的控制模型与前期描述的事故演变经过,识别UA序列。按照STPA方法将UA分为四类^[20]:①未提供所需的控制行为;②提供了错误的控制行为;③提供的控制行为时序错乱,过早或过迟;④提供的控制行为时效性过长或过短。

步骤7:挖掘导致人为因素失效事件的EFC

按照识别的UA序列,将每一个UA发生下的非正常情景与标准化的情景进行比较,参考绩效因子对照检查表,识别EFC及其产生的原因。

步骤8:评价UA和EFC的触发概率

在标准化的ATHEANA方法中,需要对UA和EFC的触发概率进行评估,同时需要考虑EFC恢复的可能,最终对事故的发生概率进行量化评估。通过概率值的对比,可以对不同UA和EFC下的危害性有一个直接的认知。概率计算公式为

$$P(H_{FE}) = \sum_{E_{FC}} \sum_{U_A} P(E_{FCj}) \times P(U_{Ai}|E_{FCj}) \times P(U_{NRECi}) \quad (1)$$

式中: $P(H_{FE})$ 为某一类HFE的发生概率; $P(E_{FCj})$ 为第j种EFC发生的概率; $P(U_{Ai}|E_{FCj})$ 为在第j种EFC下,第i种UA发生的概率; $P(U_{NRECi})$ 为第i种UA不可恢复的概率。

对所有的UA和EFC概率进行求和,便是某一类HFE的发生概率。

步骤9:形成最终结论

依据前期识别的UA和EFC,分别制定可行的风险管控措施,从事故链的不同阶段和系统运行的不同子部件,全面管控HFE的发生概率。根据得出的概率值,可以对UA和EFC的管控优先级进行排序,提升管控效率。通过对危险因素的分析 and 风险管控方案的整理,最终形成人为因素分析报告。

应当说明的是本文提出的方法具有定量分析

的能力,但是需要基于一定的数据积累,否则无法形成准确的计算结论。现有的研究成果中,需要借用相近邻域的基础数据进行定量分析,如人为因素失误预测技术(THERP)^[21]和CREAM^[22]方法都提供了基础人为失误行为数据和修正因子。但这些基础数据的来源并非航空领域,而是来自于化工生产和核安全管理等领域,因此计算结果会存在一定偏差。

4 偏出跑道航空事故人为因素分析应用

根据设计的ATHEANA-STPA混合方法步骤,对一起典型航空安全事故进行分析,剖析其人为因素,形成管控方案。事故报告摘录自美国国家运输安全委员会(National Transportation Safety Board,简称NTSB)发布的NTSB/AAR-16/02^[23]。

步骤1:事故描述

2015年3月5日,纽约刚刚经历了一场大雪。上午9:45,一架Delta航空公司的MD-88客机正准备飞往纽约LaGuardia机场。LaGuardia机场紧邻两个港湾,其中13号跑道离场端紧邻水面。机组在出发前收到过LaGuardia机场航行公告(Notice To Airman,简称NOTAM),预计着陆时刻(10:55)会有中度的降雪。然而机组在接收到的自动终端情报服务(Automatic Terminal Information Services,简称ATIS)信息中显示LaGuardia机场的13号跑道信息为湿滑,但跑道已经过除冰处理。

10:40,机组人员听到管制部门在无线电中讲到飞机因为跑道清理而等待的消息,而此时ATIS信息显示跑道经过清扫和化学除冰处理,但跑道仍然湿滑并伴有积雪。这使机组人员误以为飞机出云后能够大致见到跑道道面。而事实上,飞机在出云后机组看到的是完全被一层白色覆盖的跑道。

飞机在机长目视跑道17s后接地,机场上空降雪仍在持续。在飞机接地的几秒后,突然遭受了9级风速的左侧风。为能够尽快减速,机长在飞机主起落架接地的同时打开了反推装置,且左发反推力系数最大值达到了2.07,右发反推力系数达到了1.91(正常数值在1.3~1.6之间)。在巨大的反推力作用下,飞机方向舵面的气动性能下降,方向控制受阻,而跑道上的积雪又降低了滑轮的摩擦力,最终飞机未能及时修正方向,偏出跑道撞击在堤坝上。事故造成飞机严重受损,机上127名乘

客中的 29 名遭受轻伤,并未造成人员重大伤亡。

步骤 2:定义分析范围

显然该起事故是复杂天气环境和多个部门人为因素共同作用的结果,但本文将机组人为因素的产生机理作为目标问题,将其他部门和子部件作为关联因素展开分析。重点在于识别事故链中的 UA 和产生 UA 的 EFC,剖析 EFC 形成的原因和构成 EFC 的要素。

步骤 3:定义系统级事故

对本次事故中偏、冲出跑道事故展开分析,定义该类事故可能形成的系统级事故如表 1 所示。

表 1 系统级事故分类
Table 1 System level accident classification

等级	系统级事故
L-1	飞机实施备降,影响后续航班计划
L-2	飞机轻度受损,人员无伤亡
L-3	飞机严重受损,部分人员受伤
L-4	飞机严重受损,人员有伤亡

步骤 4:系统级危险的确定

事故分析过程中,系统级危险的确定需限定在本次冲出跑道事故的分析边界之内,危险因素

主要识别系统运行中的人为因素。从事故描述中提取各个可能导致安全危险的致因,如表 2 所示。

表 2 事故中的系统级危险
Table 2 System level hazards in accidents

等级	系统级危险	可能引发的系统级损失
D-1	航行情报部门未及时更新公告	ALL
D-2	机组人员决定改航备降	L-1
D-3	机组人员使用反推系统过早	L-2、L-3、L-4
D-4	机组人员操控反推系统推力过大	L-2、L-3、L-4
D-5	监控失效	L-2、L-3、L-4
D-6	方向控制失败	L-2、L-3、L-4

步骤 5:系统控制模型的构建

从事故描述中可知,机组在巡航和着陆过程中与其发生信息交互的部门主要为管制部门和航行情报部门。机场的天气实况对机组的决策和操控行为的品质均产生一定的影响。机场的地理环境对机组的决策也形成了扰动。此外,在事故航空器进近着陆过程中,其他着陆航空器在无线电中的报告也会影响机组的心理状况和决策。由此构建系统控制模型如图 4 所示。

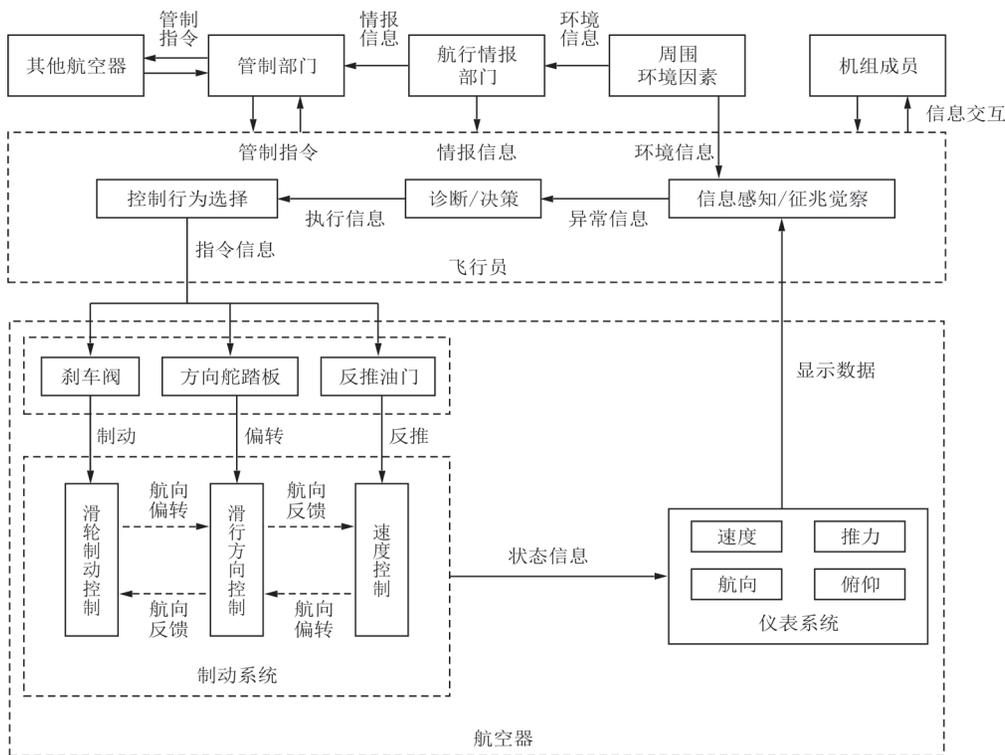


图 4 事故航空器控制结构图
Fig. 4 Accident aircraft control structure diagram

图 4 中航行情报部门发布的信息通过 NOTAM、ATIS 及管制部门传达给飞行员,飞行员基于航行情报信息和自主的观察做出是否进近的决策。飞行员对航空器姿态的判断主要基于仪表系统显示的参数及对周边环境的观察,通过观测到的信息做出飞机状态是否异常的判断,随后根据觉察到的异常情况做出修正的控制行为。在飞行员着陆滑行过程中,减速控制和方向控制之间会有较强的耦合作用,相互影响操控效果。在本次

事故中,飞行员主要通过刹车系统、反推装置及方向舵控制飞机的航向与速度。

步骤 6:识别各类情景下的 UA

从事故描述中可知,不安全控制行为主要来自于两个部分,一是航行情报部门未及时发布时的航行公告,二是飞行员在进近和着陆过程中由一系列错误的决策引发的 UA。识别的 UA 如表 3 所示。

表 3 偏出跑道事故中的 UA
Table 3 UA in runway deviation accident

UA 编号	事故来源	类别	描述
UA1	航行情报部门	未提供所需的控制行为	事故机组在航行过程中多次关注航行公告的更新情况,但始终未更新,增加机组对跑道道面情况的研判难度
UA2	机组	做出了错误的决策	机组所掌握的航行公告信息显示机场道面会有积雪,可能不具备着陆条件,但先着陆的航空器却反映制动效果良好,促使机组作出错误决策
UA3	机组	反推系统使用过早	按照 Delta 航空公司的操作手册规定,在未被彻底清理的道面上着陆时,反推系统应当在前起落架接地后再打开,但机长在主起落架接地时便打开了
UA4	机组	反推系统使用时序错误	在反推系统加力过程中,右推力加速显著大于左推力,导致了飞机航向的左偏
UA5	机组	反推系统加力持续过长	按照 Delta 航空公司的操作手册规定,在未被彻底清理的道面上着陆时,反推系统的推力系数应控制在 1.3 之内,但机组的左右发推力系数却达到了 2.07 和 1.91,导致了偏航行为

步骤 7:挖掘导致人为因素失效事件的 EFC
根据识别的 UA,逐一对照绩效因子对照检查

表,查找引发 UA 的原因,比对正常情况下的操作程序,识别 EFC。关联的绩效因子如表 4 所示。

表 4 绩效因子关联识别
Table 4 Performance factor correlation identification

UA 编号	关联的绩效因子序号	UA 原因描述
UA1	PSF-2	美国联邦航空局虽规定航行情报部门必须及时更新航行情报,但对最小更新间隔并没有做出明确;降落机场航行情报部门工作人员因跑道除雪工作耽误了最新道面信息的发布
UA2	PSF-3、PSF-5、PSF-16	自然环境的复杂性和航行情报的缺失加大了机长的心理压力;在是否继续进近的决策上,飞行员通常都更倾向于完成任务;其他飞行员的道面情况报告促使机场做出继续进近的决定
UA3~UA5	PSF-3、PSF-5、PSF-8、PSF-11、PSF-16	跑道道面的实际情况比机长的预判情况要差,进一步加剧了机长的心理压力;在未被清理的道面上使用反推装置,飞行员普遍有使用推力略大于标准数值的习惯;着陆滑行期间的操控动作时效性极强,极易错过最佳的偏差修正窗口期;湿滑并覆盖有积雪的道面降低了制动效果,方向控制更为困难;在复杂环境的作用下,机组的注意力集中在方向的修正上,其他参数的监控能力下降

将 UA 和绩效因子进行充分关联后,得出三个 EFC,描述如下:

EFC1:LaGuardia 机场的航行情报部门未及时更新跑道道面信息的原因主要来自于两方面。一是美国联邦航空局有关航行情报更新频率的制度缺陷,规定中并没有明确最小更新时间间隔的规定;二是事发当日纽约正遭受持续性降雪影响,需要定时进行道面清理维护,纽约终端区管制部门

联系机场时,航行情报部门人员正好不在位,导致了航行情报的缺失。两方面因素共同作用下,正好形成了事故航班飞行期间的情报更新空白期。

EFC2:机组若及时进行备降,则可以有效降低事故的损失等级。机组做出 UA2 的原因既来源于其本身希望尽快完成任务的心理倾向,还来源于航行情报的缺失与反复。在航行情报长时间未更新的情况下,其他飞行员的道面报告变得更为

可信,机组由此作出道面制动效果良好,可以进近的决定。

EFC3:由于道面实况与前期飞行员的报告存在较大差距,对飞行员心理形成了极大冲击。机场临水而建,且 13 号跑道端紧邻水面的地理环境给机长造成了巨大压力,加剧了机长使用大推力减速的倾向。道面的积雪降低了摩擦系数,使得航空器的方向控制更为困难,在复杂的环境下,机组对数据的监控能力降低,忽视了左右反推装置推力系数不一致的状况,采取了错误的方向修正方案。

在上述三类情景之下,极易产生相应的不安全控制行为,可通过对 EFC 的管控降低 UA 的发生概率。

步骤 8:评价 UA 和 EFC 的触发概率

以 UA2 为例展开触发概率评价方法的应用分析。此时 $P(E_{FC2})$ 主要指复杂天气下航行情报信息更新中断的发生概率; $P(U_{A2}|E_{FC2})$ 指在 EFC2 之下机组仍然决定继续进近的概率; $P(U_{NREC2})$ 指机组未中断进近,持续实施着陆的概率。则可得出该

类情景之下人为差错发生的概率为

$$P(H_{FE2})=P(E_{FC2})\times P(U_{A2}|E_{FC2})\times P(U_{NREC2}) \quad (2)$$

本文参照 THERP 方法中的基础人为失误数据和行为修正因子开展定量分析计算。其中 U_{A2} 属于决策失误,其基础概率值 $P(U_{A2})=0.01$ 。

情景修正因子 E_{FC2} 可归类为操作背景,当时的情景可判定为差,并给飞行员造成了一定的压力,修正后的概率值 $P(U_{A2}|E_{FC2})=0.01\times 1.78\times 5=0.089$ 。

EFC2 与航行情报未及时提供有关,属于遗漏行为,概率值 $P(E_{FC2})=0.003$ 。

$P(U_{NREC2})$ 则是由于机组始终对跑道的道面情况存在误判,因此未中断进近,属于诊断错误,概率值 $P(U_{NREC2})=0.02$ 。

最终的概率值 $P(H_{FE2})=0.003\times 0.39\times 0.02=2.34\times 10^{-5}$ 。

步骤 9:形成最终结论

根据识别的 UA 和 EFC,可以形成新的事故链,如图 5 所示。

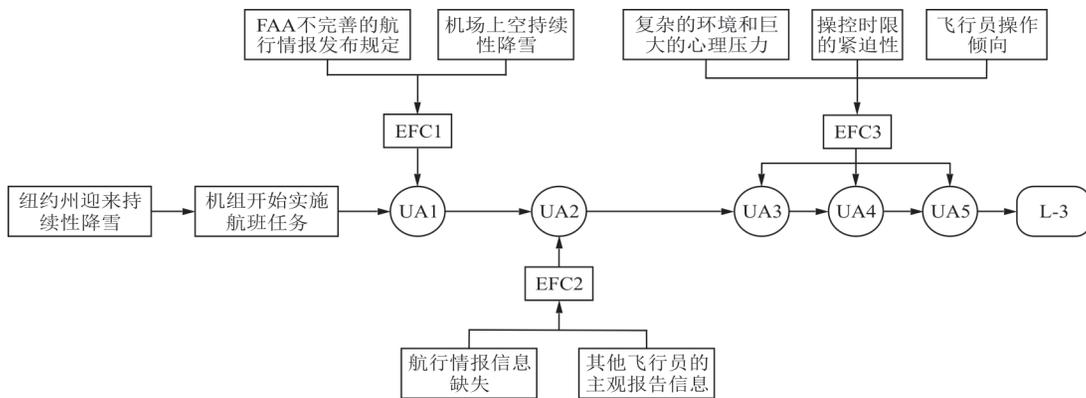


图 5 基于 UA 和 EFC 构建的事故链

Fig. 5 Accident chain based on UA and EFC

结合识别的 EFC,制定 UA 管控措施,对事故链的多个环节进行风险管控,如表 5 所示。

表 5 风险管控措施
Table 5 Risk control measures

EFC	类别	管控措施
EFC1	C-1	规定 NOTAM 和 ATIS 的最低更新频率。在复杂天气条件下应当有更高的更新频率
	C-2	航行情报部门必须时刻有人值守,确保与管制部门的通信畅通
EFC2	C-3	当飞行员观测到的机场信息与发布的航行情报信息存在不一致时,应当遵循航行情报部门发布的信息
	C-4	当机组中有人出现负面情绪或紧张心理时,机组之间应当相互提醒,避免采取一些高风险的操作行为
EFC3	C-5	反推系统的开启应当设置自动阀,避免在前机轮接地前打开而造成方向控制不稳
	C-6	反推系统使用过程中,推力值显示应当位于更显著的位置,当推力值过大时,应当进行自动告警,吸引机组人员的注意
	C-7	通过模拟训练,纠正飞行员普遍存在的使用过大推力减速的倾向性问题

通过案例的分析和模型的应用,本文成功识别了3类EFC,并以EFC的破除为思路,以系统的不同子部件为管控对象,制定了7类管控措施,防止相似情景的再现,避免人为因素失误行为的发生。

为体现本文方法的有效性,使用另一类经典的第二代HRA方法CREAM模型^[15]进行事故分析。CREAM方法对事故人为差错的计算主要基于具体的人为差错类型和事发时的人为因素绩效条件。同样以UA2为分析目标,认为其失误行为的认知功能类型为“计划”,其失效模式为“不适当的计划”。事发时对UA2有显著负面影响共同绩效条件为组织的完善性,正面影响的共同绩效条件为可用时间、培训和经验的充分性及班组成员的合作质量。根据CREAM模型提供的基础概率数据,人为失误行为概率计算方法为

$$P_{\text{CREAM}}(H_{\text{FE2}}) = P_{\text{CREAM}}(U_{\text{A2}}|E_{\text{FC2}}) = 0.01 \times 0.5 \times 1.2 \times 0.5 \times 0.5 = 0.0015$$

得出的人为失误概率值已经达到了千分之一以上,即每1 000架次中就有一次决策错误,这相对现实工作环境中的真实值明显偏大,其主要原因:一是CREAM方法对共同绩效条件的分析具有概略性,虽然提供了通用的评价指标,但会忽略大量的因素以及因素之间的关联作用,使得最终结论有较大偏差;二是CREAM方法分析过程中并没有考虑差错恢复机制,例如及时进行复飞或中断进近的情景,因此也会使差错偏大。致因因素识别的缺失将直接导致风险管控中的遗漏,不利于系统安全的改进。例如:案例中组织完善性不足导致了航行情报的更新中断,在制定风险管控措施时主要体现为强化航行情报服务机制。但对航行情报与飞行员观测结论产生分歧时的情况处理缺乏指向性,容易疏忽这一关键性漏洞。因此,本文提出的方法对飞行安全管理具有更强的现实意义。

综上所述,基于ATHEANA-STPA混合方法对事故案例的分析具有两个不同于其他分析方法的显著特征:一是以构建系统控制模型的方式挖掘系统各子部件之间的关联性,结合识别的关联性描绘UA背后的EFC,相较传统ATHEANA方法的情景识别能力更为准确;二是对UA形成的原因分析突破了ATHEANA和STPA单一视角的局限性,既能够通过绩效因子的对照检查挖掘人

为因素层面原因,也能够从系统运行的原理层面识别机械、管理与环境的原因。通过ATHEANA与STPA方法的混合应用,使得改进分析方法的适用性与结论准确性得到提升,且流程简洁,对分析者的知识结构依赖性低。以瓦解EFC的方式制定安全管控措施也进一步拓宽了管控方案制定的灵活性,可以应用于更多的安全生产领域中。

5 结 论

(1) 通过事故分析的应用,验证了ATHEANA-STPA混合方法能够对航空事故中的人为因素展开有效分析,且形成风险管控方案。

(2) STPA方法对风险管控基于识别的UA,ATHEANA方法则主要基于构建的EFC。通过UA和绩效因子的识别,ATHEANA方法构建的EFC可以作为人为因素差错管控的关键性线索,通过控制EFC的出现概率实现降低相关人为因素差错的发生。

(3) ATHEANA-STPA混合方法结合了STPA方法系统化的分析视角和ATHEANA方法人为因素的分析优势,注重前后各因子的关联性挖掘,基于一定基础数据,能够对人为因素失误行为开展定量分析。

参考文献

- [1] ZHOU T, ZHANG J, BAASANSUREN D. A hybrid HFACS-BN model for analysis of Mongolian aviation professionals' awareness of human factors related to aviation safety[J]. Sustainability, 2018, 10(12): 4522.
- [2] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. A human error approach to aviation accident analysis: the human factors analysis and classification system [M]. US: Routledge Press, 2017.
- [3] WIENER E L, NAGEL D C. Human factors in aviation [M]. San Diego, CA: Academic Press, 1988.
- [4] REASON J. Human error: models and management [J]. BMJ (Clinical Research Edition), 2000, 320: 768-770.
- [5] 崔铁军, 马云东. 多维空间故障树构建及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 32-37.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on multi-dimensional space fault tree construction and application [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(4): 32-37. (in Chinese)
- [6] HUANG G Q, SHI J, MAK K L. Failure mode and effect analysis (FMEA) over the WWW [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(8): 603-608.
- [7] LEVESON N. A new approach to hazard analysis for com-

- plex systems[C]// 2003 International Conference of the System Safety Society. US: AIAA, 2003: 498-507.
- [8] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems[J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.
- [9] 丛继平, 崔利杰, 陈浩然, 等. 空中加油软管“甩鞭”现象安全性分析与仿真验证研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1958-1965.
CONG Jiping, CUI Lijie, CHEN Haoran, et al. Research on safety analysis and simulation validation of HWP in air refueling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(10): 1958-1965. (in Chinese)
- [10] 赵长啸, 李浩, 董磊, 等. 基于 STPA-Bayes 模型的机载平视显示系统安全性分析与评价[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(5): 1080-1092.
ZHAO Changxiao, LI Hao, DONG Lei, et al. Safety analysis and evaluation of airborne HUD system based on STPA-Bayes model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(5): 1080-1092. (in Chinese)
- [11] FORESTER J, BLEY D, COOPER S, et al. Expert elicitation approach for performing ATHEANA quantification[J]. Reliability Engineering System Safety, 2004, 83(2): 207-220.
- [12] TERESA R, PAMELA F. Application of the ATHEANA methodology for the HRA of a PSA scenario for a BWR nuclear power plant[C]// The 10th International Conference on Probabilistic Safety Assessment & AMP Management. US: [s. n.], 2010: 1520-1530.
- [13] 张力, 许康. 人因可靠性分析的新方法——ATHEANA: 原理与应用[J]. 工业工程与管理, 2002, 7(5): 14-19.
ZHANG Li, XU Kang. ATHEANA: a new method of human reliability analysis-theory and its application[J]. Industrial Engineering and Management, 2002, 7(5): 14-19. (in Chinese)
- [14] SU R E, XUE H J. Pilot human errors analysis of some aircraft accident using ATHEANA method[C]// International Conference on Intelligent Computation and Industrial Application. [S. l. : s. n.], 2011: 269-272.
- [15] 刘继新, 曾道宇, 冯思旭, 等. 基于改进 CREAM 扩展法的管制人员人因可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2246-2251.
LIU Jixin, ZENG Xiaoyu, FENG Sixu, et al. Human reliability analysis of the air traffic controllers based on the development method of CREAM[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6): 2246-2251. (in Chinese)
- [16] 赵振武, 张微. 基于改进 CREAM 的管制员与飞行员间人因可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 185-188.
ZHAO Zhenwu, ZHANG Wei. Human reliability analysis of the cooperative relation between the pilot and the controllers based on CREAM[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(1): 185-188. (in Chinese)
- [17] 张悦涵. 基于 ATHEANA 的地铁站应急管理中的的人因失误研究[D]. 北京: 首都经贸大学, 2017.
ZHANG Yuehan. Research on human error in emergency management of subway station based on ATHEANA[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017. (in Chinese)
- [18] 刘炳琪, 胡剑波, 刘畅, 等. 飞机差动刹车纠偏过程的 STAMP/STPA 安全性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(4): 66-73.
LIU Bingqi, HU Jianbo, LIU Chang, et al. STAMP/STPA safety analysis of aircraft differential braking correction process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(4): 66-73. (in Chinese)
- [19] 陈苗芳. STPA 中危害分析和安全性需求捕获的自动化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
CHEN Miaofang. Research on automation technology of hazard analysis and safety requirement capture in STPA[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [20] 张宏宏, 甘旭升, 孙静娟, 等. 基于 STPA-TOPAZ 的低空无人机冲突解脱安全性分析[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 262-274.
ZHANG Honghong, GAN Xusheng, SUN Jingjuan, et al. Analysis of low altitude UAV conflict resolution safety based on STPA-TOPAZ[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 262-274. (in Chinese)
- [21] SWAN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications[J]. Applied Ergonomics, 1985, 16(1): 68.
- [22] 杨越, 张燕飞, 王建忠. 基于 CREAM 和贝叶斯网络的空管人误概率预测方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 37-43.
YANG Yue, ZHANG Yanfei, WANG Jianzhong. Prediction method of human error probability in air traffic management based on CREAM and Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 37-43. (in Chinese)
- [23] National Transportation Safety Board. Runway excursion during landing; NTSB/AAR-16/02[R]. Washington, DC: National Transportation Safety Board, 2016.

作者简介:

牛军锋(1979—),男,硕士,副教授。主要研究方向:信息管理与信息技术。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:非线性系统建模,空管安全,防相撞。

魏潇龙(1994—),男,硕士,讲师。主要研究方向:空管安全,防相撞。

王明华(1981—),女,博士,讲师。主要研究方向:空管安全,防相撞。

(编辑:丛艳娟)