

文章编号: 1674-8190(2022)06-059-10

空管人因失效概率的 THERP-CREAM 预测方法

张建祥¹, 甘旭升², 吴亚荣², 杨芮²

(1. 西京学院 电子信息学院, 西安 710123)

(2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 管制员的人为差错是导致航空器空中相撞的主要原因之一, 对空管人因失效概率进行有效预测是一个难题。为此, 提出一种基于人误率预测技术(THERP)与认知可靠性和失误率分析模型(CREAM)的组合空管人因失效概率预测方法, 基于 THERP 技术二叉树模型构建事故发展基本脉络, 而后基于 CREAM 方法对各个个人误行为触发概率进行修正, 从而得出更为准确的概率预测结果。通过对相似事故进行对比分析, 结果表明: 本文提出的预测方法可识别关键性的事故影响因子, 以便制定有针对性的管控措施, 从而为研究预测空管人因失效概率提供了一种有效的分析手段。

关键词: 人误率预测技术; 空管; 人因; 失效概率

中图分类号: V328; TP18

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.06

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



THERP-CREAM Prediction Method for Failure Probability of Human Factor of Air Traffic Control

ZHANG Jianxiang¹, GAN Xusheng², WU Yarong², YANG Rui²

(1. School of Electronic Information, Xijing University, Xi'an 710123, China)

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

Abstract: The human error of air traffic controller is the main cause of the aircraft collision in the air, and it is a difficult problem to effectively predict the failure probability of human factor of air traffic control (ATC). For this, on the basis of technique of human error rate prediction (THERP) and cognitive reliability and error analysis method (CREAM), a hybrid prediction method is proposed for failure probability of ATC human factor. Based on the binary tree model of THERP method, the basic chain of accident development is constructed, and then the triggering probability of human unsafety action is modified based on CREAM method, so as to draw a more accurate probability prediction conclusion. Through the comparative analysis of similar accidents, the key accident impact factors can be identified, and formulate targeted control measures. This paper provides an effective analysis method for studying the failure probability prediction of ATC human factor.

Key words: THERP; air traffic control; human factor; failure probability

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2022-05-10

通信作者: 甘旭升, gxsh15934896556@qq.com

引用格式: 张建祥, 甘旭升, 吴亚荣, 等. 空管人因失效概率的 THERP-CREAM 预测方法[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 59-68.

ZHANG Jianxiang, GAN Xusheng, WU Yarong, et al. THERP-CREAM prediction method for failure probability of human factor of air traffic control[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 59-68. (in Chinese)

0 引言

人为因素是导致航空器相撞事故或事故征候最重要的原因之一。对可能出现的人为差错进行识别与控制是事故预防的关键环节。统计数据表明,由于管制员的人为差错导致的空管不安全事件逐年增多。当前我国对空管人因差错的研究相对薄弱,诸多不安全事件亟需展开总结分析与评估预测,通过找出空管人因失效的“关键症结”,可有效改善防相撞管理工作的整体安全水平。

人的失误率预测技术(Technique of Human Error Rate Prediction,简称 THERP)^[1]的概念模型属于第一代人因可靠性分析(HRA)方法,其最早出现在人因可靠性分析的第一届国际学术会议上,并在核电等领域得到应用^[2]。20世纪80年代后,HRA方法发展到了第二代^[3],比较有代表性的是认知可靠性和失误率分析模型(Cognitive Reliability and Error Analysis Method,简称 CREAM)^[4-5],此类方法受心理学、行为学等的影响,侧重于特定环境,通过分析环境、设备等影响因素,对人为差错的发生机理进行描述。S. T. Shorrock等^[6]利用回溯性分析技术(Technique for the Retrospective Analysis of Cognitive Errors,简称 TRACER)分析空中交通管制运行中的人误行为,该方法注重对人的内部因素和外部因素的剖析,认为人误行为是内外部因子共同作用的结果,因此分析结论较为系统,但该方法缺乏定量分析的功能。美国联邦航空局和欧控组织在人误分析分类系统(Human Factors Analysis and Classification System,简称 HFACS)和空管人误分析系统(Human Error in Air Traffic Management,简称 HERA)的基础上,提出了空管人误分类方法(Human Error in ATM Technique-JANUS,简称 HERA-JANUS),用于对人误行为预测和风险的管控,并在实际应用中取得了较好的效果^[7],但该模型同样是一种对人误行为的分析分类方法,不具有定量分析的能力。

为了加强对空管人误行为定量化的研究,研究人员开展了进一步地尝试。F. Castiglia等^[8]提出了 THERP-HEART 混合分析方法,对医疗过程中的药物使用过量人误行为进行了定性和定量分析,具有一定的参考意义;刘继新等^[9]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,但 CREAM 方法原本并非应用于空管领域,因此基础数据的准确性会存在偏差,需要加以改进;杨子瑜^[10]分析了管制员人为因素与社会背景的相关性,提出并探索了人因失误的长效风险预警机制;赵振武等^[11]利用 CREAM 对管制员与飞行员交互的可靠性进行评价,但该研究未对模型进行修正。上述研究有助于改进操作环境、规范操作员行为,也为多领域的安全评价与预防做出了贡献。然而,以上提及的分析方法都有一定的局限性,如 THERP 的取值存在专业性要求,在组织管理等方面也存在不足,将其直接用于空管人因失效分析缺乏科学性^[12]。因此,有必要设计一种能够对空管人误行为同时开展定性和定量分析的有效方法,以辅助风险管控工作的开展。

基于以上分析可以发现,在缺少空管人误数据的情况下,对传统人因分析模型进行修正的难度较大,国内外尚无有效的方法。但在同一模型框架下,通过不同事例间的对比分析,可以得出较为准确的差异性结论。因此,本文将 THERP 和 CREAM 有机融合,据此定量分析空管人因不安全事件,构建空管人因失效概率预测模型,并通过实例验证其有效性。

1 THERP 模型

THERP 模型将人的工作划分成为相互联系的子任务,从而预测人类工作能否成功和安全地实现目标^[13]。该方法基于事件树^[14]的分析方式,通过划分路径推演出人员在各个任务中的基本动作,并预判其是否成功,进而获取具体分析数据。

THERP 分析过程可划分为四个阶段:

第一阶段:系统熟悉阶段。该阶段需实地走访调研,获得第一手资料。先了解其环境中发生的历史人因不安全事件,同时,收集整理工作中完成任务所需步骤、执行任务时周边其他条件。

第二阶段:定性分析阶段。该阶段需分解各个任务步骤,随后针对任务流程构建相应事件树。划分完成后,对于上下衔接、相互联系的子任务,需要对所用设备、人员行为、环境风险、人机设置等影响因素进行明确。同时,也要梳理共同受理这项任务的团队人员之间的作用,并找出其相互之间的关系。在分析完成后,利用二叉树对事件进行描述,如图 1 所示。根据之前子任务的划分结

果,给出各步骤成功或失败的可能性。

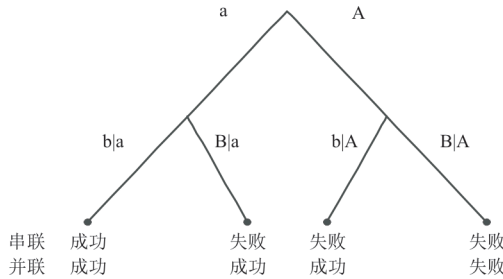


图 1 人因事件树的串、并联模式

Fig. 1 Series and parallel modes of human event tree

用大写字母 A、B 表示事件失败,用小写字母 a、b 表示事件成功。根据系统串联或并联的不同情况,事件最终完成的相应概率值也会不同。

第三阶段:定量分析阶段。

(1) 串联

成功的概率: $P(S) = a(b|a)$

失败的概率:

$$P(F) = 1 - a(b|a) = A(B|a) + A(b|A) + A(B|A)$$

(2) 并联

成功的概率:

$$P(S) = 1 - A(B|A) = a(b|a) + a(B|a) + A(b|A)$$

失败的概率: $P(F) = A(B|A)$

考虑行为形成因子(PSF)对子任务的实际概率(HEP)进行修正的结果为: $HEP = B \cdot HEP \cdot (PSF)_1 \cdot (PSF)_2 \dots$

根据相关程度进行分类,可以分为五类:完全相关(CD)、高相关(HD)、中相关(MD)、低相关(LD)以及零相关(ZD),则人误概率计算公式为

$$CD: P(B|A) = 1$$

$$HD: P(B|A) = [1 + P(B)] / 2$$

$$MD: P(B|A) = [1 + 6P(B)] / 7$$

$$LD: P(B|A) = [1 + 19P(B)] / 20$$

$$ZD: P(B|A) = P(B)$$

第四阶段:对结果进行运用。

2 CREAM 模型

CREAM 基于情景控制模型(COCOM)对人的认知行为进行分类,并划分成四种控制模式,即混乱型、机会型、战术型和战略型^[4,9]。CREAM 能够细分行为过程中受到的影响,并将相应的反馈也纳入评价中循环迭代。在具体应用时,CREAM 又分为回溯性分析和预测性分析。回溯性分析用于追溯根本原因;预测性分析用于人员的可靠性

分析,从而量化风险,并对现有环境提出改进建议。本文侧重于 CREAM 的预测性分析。

(1) 确定事件认知行为与功能

通过分析事件的发生模式,按层次梳理其过程。各行为类型及其相应的认知功能如表 1 所示。

表 1 认知行为与认知功能表

Table 1 Cognitive behavior and cognitive function table

行为类型	认知功能			
	观察	解释	计划	执行
协调			✓	✓
通信				✓
比较		✓		
诊断		✓	✓	
评估		✓	✓	
执行				✓
识别		✓		
保持			✓	✓
监视	✓	✓		
观察	✓			
计划			✓	
记录		✓		✓
调节	✓			✓
扫描	✓			

(2) 评估共同绩效因子

通过实际考察、问卷调查等方式确定共同绩效因子(Common Performance Condition, 简称 CPC)值。基于给定 CPC 数值,对执行任务操作的条件进行评价,计算得出数值。

(3) 确定控制模式类型

依据不同控制模型相应的 CPC 数值,确定其控制模式类型,如图 2 所示。四种控制模式对应的失效概率区间如表 2 所示。

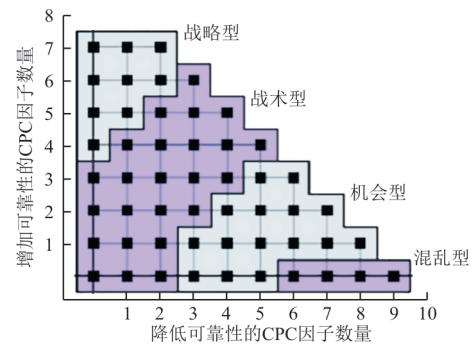


图 2 共同绩效条件分数与控制模式之间的关系

Fig. 2 Relationship between common performance condition score and control mode

表2 控制模式与失效概率区间表
Table 2 Control mode and failure probability interval table

控制模式	概率区间
混乱型	$0.1 < P < 1.0$
机会型	$0.01 < P < 0.5$
战术型	$0.001 < P < 0.1$
战略型	$0.000\ 02 < P < 0.01$

(4) 分析失效概率

先通过查表得出不同任务对应的认知行为,以及这些认知行为所包含的认知功能,从而确定发生可能性最大的人因失效模式,记为 CFP_{标定}。随后综合考虑环境因素,判定 CPC 对于认知功能的影响权重 (Weighting Factor, 简称 WF)。CREAM 能够提供 CPC 的权重因子表,将权重值相乘,即得出某一项认知功能的总权重因子 WF_总。

3 THERP-CREAM 预测

THERP 能够细分事件,其查表运算较为简单,结果直观;但是用于评价复杂行为时,不同研究领域的差异性不能很好得体现,可用的数据较少,用于修正的计算较为粗糙,对例如组织管理、人的应激行为等影响因素考虑其影响不够准确。CREAM 的分析与量化较为复杂,但能够细分人在进行不同任务的认知功能,可以更加精确地量化认知功能的影响。

综上所述,可在 THERP 二叉树分析基础上,使用 CREAM 方法开展更为精确的定量分析,从而达到优势互补的目的。对于提出的 THERP-CREAM 预测方法,在建立事件树后,用 THERP 按事件序列评价过程中存在的失误概率,并利用行为形成因子对其进行修正;再用 CREAM 对事故的前因后果进行归类,并利用扩展预测法对人因失效的概率 (Cognitive Failure Probability, 简称 CFP) 进行预测。

4 应用实例

4.1 事件介绍

实例基于三起事件进行具体建模计算分析。

事件 I: 2001 年 1 月 31 日 15:36, 日本航空公司一架 B747 客机 (907 航班) 由羽田机场起飞前往拿拔机场, 起飞后飞至烧津市骏河湾上空, 得到管

制员许可后爬升到 37 000 ft (1 ft=0.304 8 m)。几乎同一时间, 另一架麦道 DC-10 型客机 (958 航班) 载着 237 名乘客和 13 名机组人员, 由釜山飞往日本成田国际机场, 正在准备降落。15:55, 两机的 TCAS 突然警报。907 航班机长无视 TCAS 上升建议, 按管制员指示下降; 958 航班机长则按 TCAS 指示下降, 结果两机同时飞向同一汇聚点, 由飞行冲突走向危险接近。幸运的是, 两机机长均及时目视发现并做出规避动作。907 航班增加了下降速率, 958 航班转为爬升。两机及时地避免了相撞, 但两机最小垂直间隔仅 40 m。虽然避免了相撞, 但猛烈的规避动作却造成 907 航班上 100 多人受伤, 飞机也一定程度受损。

事件 II: 2006 年 2 月 17 日, 某部一架歼击机与民航一架 B737 发生飞行冲突。当日, 训练飞行的军航机场天气为 1 个量高云, 云底高 6 900 m, 能见度大于 10 km。一名新手飞行员驾驶某型歼击机于 13:00 起飞后至指定空域实施仪表飞行训练; 山东航空公司的一架 B737 飞机 (4089 号航班) 执行航班任务, 于 12:35 起飞, 13:08 与机场塔台取得联系。4 min 后 4089 航班报告高度 3 600 m。由于民航机场二次雷达故障, 军航塔台指挥员根据时间推算, 2 min 后令空域内的歼击机正常动作, 飞行员按指令右转下降过程中, 从 4089 航班右后侧穿越航班飞行高度, 13:14:27, 4089 航班 TCAS 告警, 两机高度差 90 m, 侧向间隔 3 km。歼击机下降后, 发现 4089 航班与其同向飞行, 随即目视航班保持同向飞行并上升高度, 13:15:36, 歼击机从 4089 航班左侧 4.2 km 上升高度时, 4089 航班 TCAS 再次告警。

事件 III: 2006 年 1 月 16 日, 厦航 B737 执行“沈阳—杭州”任务 (MF8056 航班) 与南航 B737 执行“青岛—沈阳”任务 (CZ3983 航班) 在青岛上空发生飞行冲突。事发前, CZ3983 航班在飞越 HCH 导航台后, 青岛区域管制员指挥该机保持 9 000 m 高度脱波联系大连区调, 并指挥 MF8056 航班上升至 9 600 m 保持, 当 MF8056 航班上升至 8 600 m 左右时, 青岛区域管制员意识到该机与 CZ3983 航班存在飞行冲突, 随即指挥 MF8056 航班下降至 8 400 m 保持, 并右转航向至 270° 避让, 同时电话通知大连区调指挥 CZ3983 避让, 两机正切后, 指挥飞机归航。后经雷达录像证实, 两机水平距离 13 km, 高度差 220 m。

4.2 事件分析

(1) 构建事故发展的序列并建造事件树

事件 I 可划分为五个阶段:①管制员未及时监督飞行动态;②雷达屏幕上发现两机有相撞危险,但当时实习管制员正在处理其他航班,分散了注意力,未及时处理;③实习管制员混淆了航班编号,发出错误指令;④ 907 航班机长没有听从 TCAS 建议,遵照管制员的错误指令;⑤管制教员喊错航班号。事件 I 的管制员认知行为及认知功能表如表 3 所示。

表 3 事件 I 的管制员认知行为及认知功能表
Table 3 Controller's cognitive behavior and cognitive function table of event I

阶段	任务	行为类型	认知功能			
			观察	解释	计划	执行
①	管制员未及时监督飞行动态	监视	✓	✓		
②	雷达屏幕上显示两机有相撞危险但未及时处理	计划			✓	
③	管制员混淆了航班编号	识别		✓		✓
④	管制员发出错误指令	执行	✓	✓		✓

事件 I 利用 THERP 建造的事件树如图 3 所示。

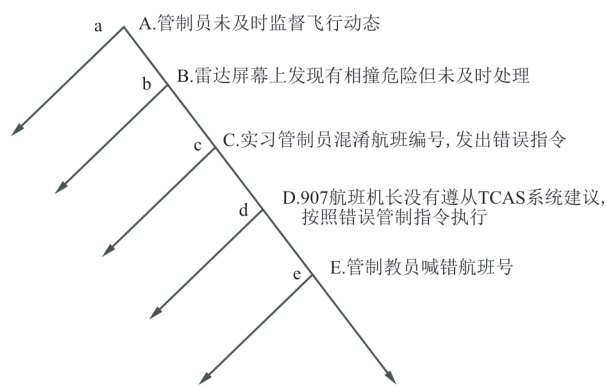


图 3 事件 I 的事件树
Fig. 3 Event tree of event I

事件 II 可划分为四个阶段:①管制员未能准确掌握空中动态;②塔台没有二次雷达信息,管制员按照时间推算方法计算错误;③管制员提前下达了正常动作的口令;④飞行员发现民航航班后避让处置方法不当。事件 II 的管制员认知行为及

认知功能表如表 4 所示。

表 4 事件 II 的管制员认知行为及认知功能表
Table 4 Controller's cognitive behavior and cognitive function table of event II

阶段	任务	行为类型	认知功能			
			观察	解释	计划	执行
①	管制员未准确掌握飞行动态	监视	✓	✓		
②	塔台无二次雷达信息,管制员按照时间推算方法计算错误	评估		✓	✓	
③	管制员提前下达正常动作的口令	执行	✓	✓		✓

事件 II 利用 THERP 建造的事件树如图 4 所示。

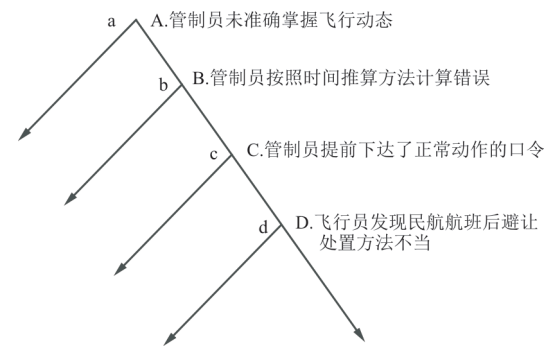


图 4 事件 II 的事件树
Fig. 4 Event tree of event II

事件 III 可划分为三个阶段:①管制员遗忘航班动态;②管制员未按进程单使用规定进行管制工作,随意下达指令;③管制员未严格执行管制工作协议进行管制协调和移交。事件 III 的管制员认知行为及认知功能表如表 5 所示。

表 5 事件 III 的管制员认知行为及认知功能表
Table 5 Controller's cognitive behavior and cognitive function table of event III

阶段	任务	行为类型	认知功能			
			观察	解释	计划	执行
①	管制员遗忘航班动态	保持			✓	✓
②	管制员随意下达指令	执行	✓	✓		✓
③	管制员未严格执行管制工作协议进行管制协调和移交	协调		✓	✓	✓

事件Ⅲ利用 THERP 建造的事件树如图 5 所示。

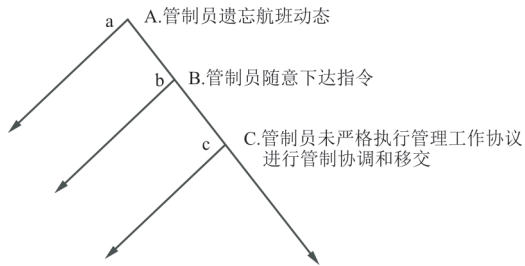


图 5 事件Ⅲ的事件树

Fig. 5 Event tree of event III

(2) 评价共同绩效条件

通过对以往资料的收集整理,参考相关专家意见,对 9 种共同绩效因子的评价如下:

①组织的完善性。基于对管制班组的合理搭配而判断。在三起事件中,组织管理层面缺少有效的运行控制机制,交叉检查及提醒的功能混乱,分工协调有明显缺陷。

②工作条件。空管人员通常处于正常的工作条件下,保障设施相对完善,有利于飞行实施。

③人机界面与运行支持的完善性。通过管制设备显示终端,管制员能够一目了然地掌握航空器的航迹、相对位置等。事件 I、Ⅲ发生时各类管制设备工作正常。事件Ⅱ中机场二次雷达故障,管制员无法准确掌握空中动态,只能按照推算方法估计飞机空中位置。

④规程/计划的可用性。调查结果显示,管制

任务存在冲突,需要对事件序列进行思考并决策。事件 I 中缺乏对发生险情制定相关预案。事件Ⅱ对缺少二次雷达信息的条件下缺少应对方法,未能制定相关预案。

⑤同时出现的目标数量。事件 I 中,同时需要指挥的飞机数目较多,管制员不能很好地把握指挥顺序,未能及时发布指令。目标数量无法与管制机构能力匹配。事件Ⅱ、Ⅲ中目标数量较少,管制机构能力能够负荷。

⑥可用时间。事件发生前,管制员并未及时发现存在的不安全因素,并及时发出正确指令,管制员的操作存在忙乱现象。事件发生时间短,容许管制员做出判断、决策的时间有限。

⑦值班时间区。三起事件发生时,管制员的工作时间均处于白天。

⑧培训和经验的充分性。在事件 I 中,实习管制员面对特情时心理负荷较重,指挥能力下降,存在经验不足、处置紧急情况不及时等现象,因此,评估为“不充分”。事件Ⅱ中,管制员推算数据错误,未能准确掌握民航航班位置。

⑨班组人员的合作质量。事件 I 中,实习管制员与管制教员协调不畅、处置能力差,分工合作质量不够好,与飞行员之间沟通失灵。事件Ⅱ、Ⅲ中缺少相关席位的配合。

事件 I~Ⅲ的绩效分析表整理后如表 6~表 8 所示。

表 6 事件 I 的绩效分析表

Table 6 Performance analysis table of event I

CPC	水平	期望效应	认知功能的固定权重因子			
			观察	解释	计划	执行
组织的完善性	无效	降低	1.0	1.0	1.2	1.2
工作条件	优越	改进	0.8	0.8	1.0	0.8
人机界面与运行支持的完善性	支持	改进	0.5	1.0	1.0	0.5
规程/计划的可用性	不适当	降低	2.0	1.0	5.0	2.0
同时出现的目标数量	与当前能力匹配	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
可用时间	暂时不充分	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
值班时间区	白天	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
培训和经验的充分性	充分,经验有限	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
班组人员的合作质量	效果差	降低	2.0	2.0	2.0	5.0

表7 事件II的绩效分析表
Table 7 Performance analysis table of event II

CPC	水平	期望效应	认知功能的固定权重因子			
			观察	解释	计划	执行
组织的完善性	无效	降低	1.0	1.0	1.2	1.2
工作条件	匹配	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
人机界面与运行支持的完善性	可容忍	不显著	5.0	1.0	1.0	5.0
规程/计划的可用性	可接受	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
同时出现的目标数量	与当前能力匹配	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
可用时间	充分	改进	0.5	0.5	0.5	0.5
值班时间区	白天	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
培训和经验的充分性	充分,经验有限	降低	1.0	1.0	1.0	1.0
班组成员的合作质量	无效	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0

表8 事件III的绩效分析表
Table 8 Performance analysis table of event III

CPC	水平	期望效应	认知功能的固定权重因子			
			观察	解释	计划	执行
组织的完善性	效果差	降低	1.0	1.0	2.0	2.0
工作条件	匹配	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
人机界面与运行支持的完善性	支持	改进	0.5	1.0	1.0	0.5
规程/计划的可用性	不适当	降低	2.0	1.0	5.0	2.0
同时出现的目标数量	与当前能力匹配	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
可用时间	充分	改进	0.5	0.5	0.5	0.5
值班时间区	白天	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0
培训和经验的充分性	充分,经验有限	降低	1.0	1.0	1.0	1.0
班组成员的合作质量	无效	不显著	1.0	1.0	1.0	1.0

(3) 识别认知功能失效模式

事件I:

①管制员未及时监督飞行动态。该阶段行为类型为观察。管制员注意力分配不当,并未掌握实时的空中飞行动态。对应的通用失效模式为 O_3 (观察没有进行)。

②雷达屏幕上显示有相撞危险但未及时处理。该阶段行为类型为计划。管制员已经知道了存在不安全风险,但是并未及时进行调整,规避危险。对应的通用失效模式为 P_1 (优先权错误)。

③管制员混淆航班编号。该阶段行为类型为观察。在当发现两架航班有冲突时,实习管制员没有辨明两架飞机的情况,混淆了飞机的高度。对应的通用失效模式为 O_2 (错误辨识)。

④管制员发出错误指令。该阶段行为类型为执行。实习管制员向错误的飞机下达了下降指

令,同时让一架飞机下降的同时并未让另一架飞机爬升。随后管制教员喊错航班号,让下降的飞机产生误解,进一步增加下降度。对应的通用失效模式为 E_3 (动作目标错误)。

事件II:

①管制员未能准确掌握空中动态。该阶段行为类型为观察。二次雷达信息不可用,使管制员无法掌握民航具体位置。对应的通用失效模式为 O_3 (观察没有进行)。

②管制员按照时间推算方法计算错误。该阶段行为类型为解释。管制员未能推断出飞机正确的空中位置。对应的通用失效模式为 I_2 (决策失误)。

③管制员提前下达了正常动作的口令。该阶段行为类型为执行。管制员提前1 min下达了正常动作的口令,调配避让留有余地较小。对应的

通用失效模式为 E_2 (动作时间错误)。

事件 III:

①管制员遗忘航班动态。该阶段行为类型为计划。管制员移交航班后便遗忘航班动态。对应的通用失效模式为 P_2 (不适当的计划)。

②管制员未按进程单使用规定进行管制工作,随意下达指令。该阶段行为类型为执行。是管制员违反管制工作程序。管制员未严格按照进程单使用规定进行管制工作,未充分执行先看雷达、再发指令的工作程序,未能准确掌握飞行动态,造成了下达管制指令的随意性。对应的通用失效模式为 E_1 (动作方式错误)。

③管制员未严格执行管制工作协议进行管制协调和移交。该阶段行为类型为执行。管制员未使用电话等手段进行必要的管制协调和移交。对应的通用失效模式为 E_5 (动作遗漏)。

(4) 分析 CPC 因子

将事件 I ~ III 的 CPC 因子整理如表 9~表 11 所示。

表 9 事件 I 的 CPC 因子表
Table 9 CPC factor table of event I

任务	通用失效模式	CPC 因子
管制员未及时监督飞行动态	O_3 观察没有进行	1, 2, 3, 5, 8, 9
雷达屏幕上显示有相撞危险但未及时处理	P_1 优先权错误	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9
管制员混淆航班编号	O_2 错误辨识	3, 4, 5, 6, 8
管制员发出错误指令	E_3 动作目标错误	1, 3, 4, 6, 8, 9

表 10 事件 II 的 CPC 因子表
Table 10 CPC factor table of event II

任务	通用失效模式	CPC 因子
管制员未能准确掌握空中动态	O_3 观察没有进行	1, 2, 3, 5, 8, 9
管制员按照时间推算方法计算错误	I_2 决策失误	3, 4, 5, 6, 8
管制员提前下达口令	E_2 动作时间错误	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9

表 11 事件 III 的 CPC 因子表
Table 11 CPC factor table of event III

任务	通用失效模式	CPC 因子
管制员遗忘航班动态	P_2 不适当的计划	1, 3, 4, 5, 6, 8
管制员随意下达指令	E_1 动作方式错误	1, 3, 4, 8, 9
管制员未严格执行管制工作协议进行管制协调和移交	E_5 动作遗漏	1, 4, 9

(5) 人因失效概率计算

1) THERP 计算

通过查询 THERP 手册得出各阶段失效概率值,根据事件树进行失效概率计算。此外,对基本概率值的修正因子使用行为形成因子(PSF),其取值同样来自 THERP 手册。相关性的取值由专家根据事故前因后果间的联系程度,根据经验知识判断,具体公式参见文献[12]。

事件 I:

$$P(F_1) = P(A) = 0.002$$

$$P(F_2) = P(B|A) = 0.001 \times 0.998$$

$$P(F_3) = P(C|B|A) = 0.05 \times 0.999 \times 0.998$$

$$P(F_4) = P(D|C|B|A) =$$

$$0.01 \times 0.95 \times 0.999 \times 0.998$$

$$P(F_5) = P(E|D|C|B|A) =$$

$$0.05 \times 0.99 \times 0.95 \times 0.999 \times 0.998$$

$$P(F) = P(F_1) + P(F_2) + P(F_3) + P(F_4) +$$

$$P(F_5) = 0.109\ 203\ 638\ 05$$

HEP 修正:

①紧张程度:轻度紧张状态,考虑行为形成因子(PSF)对子任务的实际概率(HEP)进行修正的结果,PSF 取值 2;

②相关性估计:取中相关 MD:

$$P_1 = [1 + 6P(F)] / 7 \times 2 = 0.236\ 460\ 3$$

可计算出,事件 I 的失效概率为 23.64%。

事件 II:

$$P(F_1) = P(A) = 0.002$$

$$P(F_2) = P(B|A) = 0.02 \times 0.998$$

$$P(F_3) = P(C|B|A) = 0.05 \times 0.98 \times 0.998$$

$$P(F) = P(F_1) + P(F_2) + P(F_3) = 0.054\ 744\ 3$$

HEP 修正:

①紧张程度:按部就班状态,PSF 取值 1;

②相关性估计:取中相关 MD:

$$P_2 = P = [1 + 6P(F)] / 7 \times 1 = 0.189\ 8$$

可计算出,事件 II 的失效概率为 18.98%。

事件 III:

$$P(F_1) = P(A) = 0.002$$

$$P(F_2) = P(B|A) = 0.001 \times 0.998$$

$$P(F_3) = P(C|B|A) = 0.05 \times 0.999 \times 0.998$$

$$P(F) = P(F_1) + P(F_2) + P(F_3) = 0.102\ 5$$

HEP 修正:

①紧张程度:按部就班状态,PSF 取值 1;

②相关性估计:取低相关LD:

$$P_3 = P = [1 + 19P(F)] / 20 \times 1 = 0.1475$$

可计算出,事件Ⅲ的失效概率为14.75%。

2) CREAM计算

根据CREAM扩展预测法,查表得到失效的基本概率,并通过式(1)可计算出总权重因子,将总权重因子与失效基本概率值CFP_{标定}相乘,得到失效概率CFP_{修正}。再通过式(2)可得到失效概率。

$$WF_i = \prod_{j=1}^9 WF_{ij} \quad (1)$$

$$p = 1 - \prod_{i=1}^7 (1 - CFP_i) \quad (2)$$

事件Ⅰ~Ⅲ的CPC因子表如表12~表14所示,结合表12~表14,能够计算出三起事件的失效概率。

表12 事件Ⅰ的CPC因子表
Table 12 CPC factor table of event I

行为类型	通用失效模式	CFP _{标定}	总权重因子	CFP _{修正}
观察	O ₃ 观察没有进行	0.07	1.6	0.112
计划	P ₁ 优先权错误	0.01	12.0	0.12
观察	O ₂ 错误辨识	0.07	1.6	0.112
执行	E ₃ 动作目标错误	0.0005	4.8	0.0024

计算得出P₁=0.307,即事件的失效概率为30.7%。

表13 事件Ⅱ的CPC因子表
Table 13 CPC factor table of event II

行为类型	通用失效模式	CFP _{标定}	总权重因子	CFP _{修正}
观察	O ₃ 观察没有进行	0.07	2.5	0.175
解释	I ₂ 决策失误	0.001	0.5	0.0005
执行	E ₂ 动作时间错误	0.001	3.0	0.003

计算得出P₂=0.178,即事件的失效概率为17.8%。

表14 事件Ⅲ的CPC因子表
Table 14 CPC factor table of event III

行为类型	通用失效模式	CFP _{标定}	总权重因子	CFP _{修正}
计划	P ₂ 不适当的计划	0.01	3.0	0.03
执行	E ₁ 动作方式错误	0.003	0.96	0.00288
执行	E ₅ 动作遗漏	0.03	0.96	0.0288

计算得出P₃=0.061,即事件的失效概率为6.1%。

经过计算对比,事件Ⅰ与事件Ⅲ中的偏差值较大。分析如下:

(1) 通过THERP数据库查表得到的值,在空管领域应用不够准确,还需根据具体应用领域进行深入改良。

(2) 在事件Ⅰ中,管制员意识到错误以后,精神紧张,导致判断能力下降,进而连续出现错误;事件Ⅲ中,管制员存在麻痹心理,未遵循各类程序进行指挥,是造成遗忘的致因之一;而在事件Ⅱ中,管制员发出指令的时间根据推算产生,其未意识到推算有误,从而没有紧张,行为因子的影响程度较小。在CREAM中,人在进行操作时被认为会遵循一定的目的,并且根据环境的实时反馈调整自己的行为,让其与自己的认知预期相符合。对于事件Ⅰ、Ⅲ,用CREAM预测的人因失效概率值更大,可从侧面印证CREAM将人的行为反馈纳入分析,从而得到更高的失效概率。

(3) 本文计算的结果概率值具有特定的情景背景,在现实中很难复现,但通过概率计算值的对比分析可以更清晰地突显不同因素对人误概率的影响程度,例如事件Ⅰ中的航空器目标数量相对事件Ⅱ和事件Ⅲ更多,而最终的概率值也更高,说明这一因素对管制员工作负荷影响显著,相对其他因子具有更大的防控价值。由此可更好地指导管制部门进行高效的风险管控,提高空域运行整体安全性。

(4) 对比分析:当前一些空管人误分析模型在结合一定分析理论的基础上能够纠正模型原有的部分误差,但在立足原有模型数据条件下,纠正的程度始终有限。例如文献[5],使用贝叶斯理论进一步细化了人误行为情景条件,可以使概率计算更为精确,但仍然无法摆脱对模型基础数据的依赖。本文的人误行为分析难度不仅更低,且通过对比分析的原理消除了基础数据误差的影响,并不影响分析结论的准确性,可为风险管控提供一种新的人误行为分析思路。

5 结论

(1) 针对空管人员面对特殊情况的处置流程,采用THERP与CREAM按其发展过程进行分析,

可计算出事件的失效概率。

(2) 本文设计的分析方法兼具定性和定量分析的能力,能提高原有 THERP 分析方法的概率预测精度,但仍然是一种概略性预测方法。在人误行为的对比分析上准确可信,可辅助风险管理工作的开展。通过三个事故的对比分析可以发现,航空器数量这一因子对人误行为的影响最为显著,这一特点可辅助管制部门开展更具有针对性的风险管控工作。

参考文献

- [1] SWAN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications (NUREG/CR -1278) [M]. Washington DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- [2] 高文宇. 核电厂人因可靠性分析的几个问题研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
GAO Wenyu. Study of several problems of human reliability analysis in nuclear power plant [D]. Hengyang: University of South China, 2011. (in Chinese)
- [3] AKYUZA E, CELIK M. Computer-based human reliability analysis onboard ships[J]. Procedia-Social and Behavioral Science, 2015, 195: 1823-1832.
- [4] 马莉娜, 罗渝川. 基于 CREAM 模型的法航 447 事故分析[J]. 电子技术, 2020, 49(6): 86-87.
MA Lina, LUO Yuchuan. Analysis of air France 447 accident based on CREAM model[J]. Electronic Technology, 2020, 49(6): 86-87. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] SHORROCK S T, KIRWAN B. Development and application of a human error identification tool for air traffic control [J]. Applied Ergonomics, 2002, 33(4): 319-336.
- [7] 吴聪, 解佳妮, 杜红兵, 等. 基于 HERA-JANUS 模型的空管人误认知分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 92-99.
WU Cong, XIE Jiani, DU Hongbing, et al. Cognition analysis of human errors in ATC based on HERA-JANUS model[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(6): 92-99. (in Chinese)
- [8] CASTIGLIA F, GIARDINA M, TOMARCHIO E. THERP and HEART integrated methodology for human error assessment[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 116(3): 262-266.
- [9] 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)
- [10] 杨子瑜. 空中交通管制员人因失误影响因素相关性研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
YANG Ziyu. Study on relativity of human error influencing factors of air traffic controller[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 童节娟, 余少杰, 赵军. 核电站人员可靠性分析方法 THERP 中的班组因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(9): 1425-1428.
TONG Jiejuan, YU Shaojie, ZHAO Jun. Team factors in THERP of human reliability analyses for nuclear power plants [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1425-1428. (in Chinese)
- [13] 徐培娟, 彭其渊, 文超, 等. 基于 THERP-Markov 原理的高铁列调人因可靠性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 133-140.
XU Peijuan, PENG Qiyuan, WEN Chao, et al. Human reliability analysis on high-speed train dispatcher based on THERP and Markov theories [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 133-140. (in Chinese)
- [14] 张林. 基于故障树的网络环境主机故障检测系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
ZHANG Lin. Design and implementation of network environment host failure detection system based on fault tree [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010. (in Chinese)

作者简介:

张建祥(1980—),男,硕士,副教授。主要研究方向:计算机仿真。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:空域管理。

吴亚荣(1977—),女,博士,副教授。主要研究方向:防相撞。

杨芮(1991—),女,硕士,讲师。主要研究方向:空域管理。

(编辑:马文静)