

文章编号: 1009-6094(2018)03-0866-06

可控飞行撞地风险因素分析及系统结构研究*

杨 姝¹, 雒旭峰², 李俊龙¹

(1 中国民航飞行学院空中交通管理学院, 四川广汉 618307;
2 中国民航局航空事故调查中心, 北京 100028)

摘 要: 我国运输航空的伊春“8·24”空难是一起典型的可控飞行撞地(CFIT), 该类事故严重影响飞行安全, 因此研究 CFIT 风险因素结构模型对该类飞行事故的分析 and 预防有非常重要的意义。通过分析大量 CFIT 事故及事故征候, 使用 SHEL 模型识别出 18 项风险因素, 使用德尔菲法确定各因素之间的直接影响关系, 通过决策试验和评价试验法分析出机组技术、机组应急能力、机组经验、疲劳状况、驾驶舱资源管理、民航法规及安全管理是最重要的致因因素, 并确定了各类风险因素所属类别; 采用解释结构模型法构建了风险因素的多级递阶结构模型, 从整体上获得了各风险因素的层次结构及关系。

关键词: 安全系统学; 风险结构; DEMATEL-ISM; CFIT; 多级递阶结构模型

中图分类号: X949

文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.008

0 引言

可控飞行撞地(Controlled Flight Into Terrain, CFIT)是指一架能够正常运行的飞机, 在非失效、可控的状态下与地面、障碍物或水面相撞^[1]。CFIT 绝大部分发生在进近和着陆阶段, 据美国联邦航空局(Federal Aviation of American, FAA)统计, 在客机事故中 80% 的死亡人数是由 CFIT 事故造成的, 我国民航至今共发生近 50 起 CFIT 事故, 2010 年 8 月 24 日发生的伊春空难, 就是一起发生在进近过程中典型的 CFIT 事故^[2]。

CFIT 的发生包含众多人的不安全行为因素和物的不安全状态因素, 两类因素均有可能直接导致事故发生, 众多不安全因素之间又可能存在千丝万缕的关系, 因此构成了一个复杂系统。1977 年, Wiener^[3]首次对 CFIT 事故成因进行了分析, 得到飞行员-管制员沟通失效、机组压力、政府监管及视觉错误等致因因子, 并指出人为因素是其中最主要的原因。国内自汪磊等^[4]采用事故树模型对 CFIT 事故进行分析后, 相关学者相继采用贝叶斯网络^[5]、功能共振模型^[6]、对应分析^[7]及序关系分析法^[8]等对风险因素进行了分析。但上述研究对各因素的重要度及相互作用缺乏深入研究, 未能建立 CFIT 事故风险因素体系的层次结构。

本文采用 SHEL 模型分析 CFIT 风险因素种类, 采用决策试验和评价试验(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)法分析 CFIT 事故风险因素的重要程度, 找出

关键风险因素, 确定风险因素所属类别, 并采用解释结构模型(Interpretive Structural Modeling, ISM)法构建风险因素的多级递阶结构模型, 建立风险因素体系的层次结构, 以期 CFIT 事故的预防和调查奠定基础。

1 基于 SHEL 模型的 CFIT 风险因素识别

CFIT 不同于航空器机械故障、飞行员失能及劫机等引起的航空事故, 它的一个关键点是飞机在撞地时并不是处于一种不可控制或不愿控制的状态, 因此人成为该类事故发生的因素。而 SHEL 模型^[9-10]的关键即是人处于核心地位, 人与人(Liveware)、硬件(Hardware)、环境(Environment)及软件(Software)之间的相互关系是该模型的 4 个界面, 这些界面必须相互匹配, 否则系统就不能正常发挥作用。

1.1 基于 SHEL 模型的伊春空难分析

基于 SHEL 模型对伊春“8·24”空难^[2]的分析如下。

1) 在人的方面, 事故机长总飞行时间为 4 250 h, 驾驶此型号航空器的飞行时间为 1 413.13 h, 机组均为首次执行伊春机场飞行; 在所在航空公司的飞行技术管理记录中该机长频繁出现与进近着陆相关的超限事件, 本事故进近过程中机组在能见度低于最低标准时仍实施进近, 在未建立目视参考的情况下穿越最低下降高度, 且在机载设备告警时未采取复飞措施, 成为导致该起飞行事故的直接原因; 副驾驶畏惧权威, 盲从机长, 驾驶舱资源管理不合理, 管制员未能察觉潜在危险并提醒飞行员。

2) 在硬件方面, 飞机配备的增强型近地警告系统地形数据库中没有伊春机场的地形数据。

3) 在环境方面, 事发时间为夜间, 伊春机场地处山谷交会漫滩处, 事发当晚出现辐射雾, 2 h 内能见度从 8 000 m 骤降至 600 m, 所采用的 30 号跑道没有仪表着陆系统, 实施的是只有水平引导、没有垂直引导的 VOR/DME 进近程序, 进近灯光为简易进近灯光系统, 无跑道中线灯, 且无相关监视设备。

4) 在软件方面, 航空公司对事故机长操作技术粗糙、进近着陆不稳定等问题失察, 对安全运行所需的资金和技术支持不够, 经营班子频繁调动; 监管部门在航空公司未取得哈尔滨至伊春航线经营许可的情况下, 审定同意该航线的运行许可。

1.2 CFIT 风险因素的识别

对国内外大量 CFIT 事故及事故征候进行了分析, 参照相关资料, 识别出 CFIT 事故的四大类 18 项风险因素, 其编号以及定义见表 1。

2 基于 DEMATEL 的 CFIT 风险因素影响程度分析

DEMATEL 方法^[11-12]是由美国 Bottelle 研究所提出、运用图论与矩阵工具进行系统要素分析的方法。本文采用 DEMATEL 方法分析 CFIT 风险因素的重要程度, 找出关键风险因素, 并区分因素类型。

2.1 直接影响矩阵的建立

针对以上识别出的四大类 18 项 CFIT 风险因素, 用 β_{ij} ($i = 1, \dots, 18; j = 1, \dots, 18$) 表示因素 α_i 对因素 α_j 的直接影响程度, β_{ij} 取值如下。

* 收稿日期: 2018-03-14

作者简介: 杨姝, 讲师, 硕士, 从事空域规划、飞行程序设计研究, cafucys@163.com。

基金项目: 民航安全能力建设资金项目(0241723); 中国民航飞行学院面上项目(J2015-52)

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 4 & \alpha_i \text{ 对 } \alpha_j \text{ 影响强} \\ 3 & \alpha_i \text{ 对 } \alpha_j \text{ 影响较强} \\ 2 & \alpha_i \text{ 对 } \alpha_j \text{ 影响一般 } (i, j = 1, \dots, 18) \\ 1 & \alpha_i \text{ 对 } \alpha_j \text{ 影响弱} \\ 0 & \alpha_i \text{ 对 } \alpha_j \text{ 无影响} \end{cases} \quad (1)$$

深飞行教员对其打分,得到直接影响矩阵 $B(B = (\beta_{ij})_{18 \times 18})$, 见表2。由于因素间的相互影响关系并非等同,一般情况下 $\beta_{ij} \neq \beta_{ji}$, 当 $i = j$ 时 $\beta_{ij} = 0$ 。

2.2 综合影响矩阵的计算

经计算 $\max_{1 \leq i \leq 18} \sum_{j=1}^{18} \beta_{ij} = 53$, 得归一化直接影响矩阵 $C(C =$

采用德尔菲法,邀请30位民航局事故调查中心专家和资 (c_{ij})_{18 × 18}) 如下。

表1 基于SHEL模型的CFIT风险因素分析
Table 1 Risk factors analysis of CFIT based on SHEL

风险类	风险因素	描述
人 (L-L)	机组资历 α_1	工作年限、驾驶该类机型总飞行时间、飞行员等级
	机组技术 α_2	驾驶水平、查阅分析航图等资料的能力
	机组经验 α_3	特指对该机场程序及周边环境的熟悉程度
	机组应急能力 α_4	及时采取有效纠正措施的能力
	机组疲劳状况 α_5	疲劳程度
	机组性格 α_6	机长蛮干自大、鲁莽冲动的程度; 副驾驶是否畏惧权威, 盲从机长决策
	驾驶舱资源管理 α_7	机长与副驾驶是否合理分配人力资源, 有无交叉检查
	管制员 α_8	管制员与飞行员沟通是否顺畅, 管制员能否察觉并提醒飞行员存在潜在危险
硬件 (L-H)	机载设备 α_9	指航空器导航数据库、近地告警系统的配备, 导航数据及地形数据的正确性、可靠性及完整性
	飞行程序及航图品质 α_{10}	飞行程序及航图公布方式的复杂程度
环境 (L-E)	天气 α_{11}	天气及能见度情况, 是否出现雨雪大雾等天气情况
	机场净空 α_{12}	机场净空状况, 穿透障碍物限制面的高山或人工障碍物的多少
	导航设备 α_{13}	所用导航设备的精密程度, 最后进近航段是否发生偏置
	监视设备 α_{14}	机场是否配有监视设备, 以提供管制员飞机位置信息
软件 (L-S)	进近灯光及标志 α_{15}	机场进近灯光系统及标志的清晰程度
	民航法规 α_{16}	相关法律法规是否健全, 实施是否到位
	安全管理 α_{17}	监管部门、航空公司及机场的安全管理是否严格
	培训交流 α_{18}	针对相关科目飞行员的培训复训情况、相关人员的安全教育情况

表2 CFIT 风险因素的直接影响矩阵 B
Table 2 Adjacent matrix B of CFIT risk factors

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}	α_{17}	α_{18}
α_1	0	4	4	3	0	3	3	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1
α_2	0	0	4	4	1	0	4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
α_3	0	4	0	4	0	0	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
α_4	0	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
α_5	0	4	3	4	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_6	0	3	3	4	2	0	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
α_7	0	1	2	4	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
α_8	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_9	0	4	3	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
α_{10}	0	4	2	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{11}	0	4	2	4	4	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
α_{12}	0	4	0	4	4	1	1	2	0	4	0	0	4	0	2	0	0	0
α_{13}	0	3	0	4	3	1	1	1	0	4	0	1	0	0	1	0	0	0
α_{14}	0	3	0	2	2	0	0	4	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
α_{15}	0	3	0	2	2	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0
α_{16}	4	1	1	1	1	0	1	2	3	4	1	1	3	1	1	0	3	3
α_{17}	3	2	1	1	2	1	4	2	3	4	1	1	1	1	1	2	0	3
α_{18}	0	4	3	3	1	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$C = \frac{1}{53}B \quad (2)$$

为确定每一个因素相对于系统中最高水平因素的最后影响,计算综合影响矩阵 $T(T = (t_{ij})_{18 \times 18})$ 如下。

$$T = C(I - C)^{-1} \quad (3)$$

2.3 各风险因素影响度(f_i)、被影响度(e_i)、中心度(M_i)及原因度(N_i)的计算

中心度 M_i 表示该风险因素在系统中的重要程度,中心度越大,重要性越高;原因度 N_i 用来划分因素类别,原因度大者,在整个系统中起原因的作用,原因度小者,在整个系统中位于结果的位置,因此可划分 $N_i > 0$ 的风险因素为原因因素, $N_i \leq 0$ 的风险因素为结果因素。对综合影响矩阵 T 按如下公式进行计算,可得 CFIT 风险因素相关数据,见表 3。

$$f_i = \sum_{j=1}^{18} t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (4)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^{18} t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (5)$$

$$M_i = f_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (6)$$

$$N_i = f_i - e_i \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (7)$$

3 CFIT 风险因素结构模型

ISM 是现代系统工程中广泛应用的一种分析方法^[13-14]。ISM 通过对表示有向图的相邻矩阵的逻辑运算,得到可达性矩阵,最终使复杂系统分解成层次清晰的多级递阶形式。

3.1 整体影响矩阵及可达矩阵的计算

针对综合影响矩阵 T ,计算整体影响矩阵 $H(H = (h_{ij})_{18 \times 18})$ 。

$$H = I + T \quad (8)$$

经多次试验,取 $\lambda = 0.06$,计算可达矩阵 $K(K = (k_{ij})_{18 \times 18})$ 。

$$\begin{cases} k_{ij} = 1 & h_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2, \dots, 18) \\ k_{ij} = 0 & h_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2, \dots, 18) \end{cases} \quad (9)$$

3.2 各级别风险因素集合的构建

对于可达矩阵 K ,可达集合 R_i 为第 i 行中 $k_{ij} = 1$ 的风险因素的集合,前项集合 S_i 为第 i 列中 $k_{ij} = 1$ 的风险因素的集合,从而可得到风险因素可达集合、前项集合及两者的交集,见表 4。

分析表 4,当 $i=4$ 时 $R_i = R_i \cap S_i$,可知第 4 项风险因素组成一组风险因素 $L_1\{\alpha_4\}$,去掉表中风险因素 α_4 后,采用 $R_i = R_i \cap S_i$ 多次重复分析,可得各级别风险因素集: $L_2\{\alpha_7, \alpha_8\}$ 、 $L_3\{\alpha_2, \alpha_3, \alpha_6\}$ 、 $L_4\{\alpha_1, \alpha_5, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{14}, \alpha_{15}, \alpha_{18}\}$ 、 $L_5\{\alpha_{11}, \alpha_{13}, \alpha_{16}, \alpha_{17}\}$ 、 $L_6\{\alpha_{12}\}$ 。

4 结果分析

4.1 风险因素重要度分析

通过 DEMATEL 算法计算可得各风险因素重要性,如图 1 所示,导致可控飞行撞地最重要的风险因素依次为机组技术 α_2 、机组应急能力 α_4 、机组经验 α_3 、机组疲劳状况 α_5 、驾驶舱

表 3 DEMATEL 计算结果

Table 3 Computation results of DEMATEL

风险因素	影响度 f_i	被影响度 e_i	中心度 M_i	原因度 N_i	因素类别
α_1	0.695 52	0.158 37	0.853 89	0.537 15	原因
α_2	0.593 34	1.357 07	1.950 41	-0.763 7	结果
α_3	0.557 58	0.791 98	1.349 56	-0.234 4	结果
α_4	0.204 21	1.465 4	1.669 61	-1.261 2	结果
α_5	0.425 91	0.836 86	1.262 77	-0.410 9	结果
α_6	0.473 06	0.282 94	0.756	0.190 13	原因
α_7	0.343 77	0.792 25	1.136 02	-0.448 5	结果
α_8	0.076 54	0.599 59	0.676 13	-0.523 1	结果
α_9	0.413 78	0.190 53	0.604 32	0.223 25	原因
α_{10}	0.323 73	0.514 29	0.838 02	-0.190 6	结果
α_{11}	0.499 61	0.191 57	0.691 18	0.308 04	原因
α_{12}	0.673 7	0.238 43	0.912 12	0.435 27	原因
α_{13}	0.491 09	0.285 58	0.776 67	0.205 51	原因
α_{14}	0.348 95	0.145 72	0.494 67	0.203 23	原因
α_{15}	0.291 3	0.194 25	0.485 55	0.097 05	原因
α_{16}	0.866 66	0.245 86	1.112 53	0.620 8	原因
α_{17}	0.902 03	0.136 85	1.038 88	0.765 18	原因
α_{18}	0.447 96	0.201 2	0.649 15	0.246 76	原因

表4 风险因素可达集合和前项集合
Table 4 Reachable set and forward set of the risk factors

i	可达集合 R_i	前项集合 S_i	$R_i \cap S_i$
1	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_7$	α_1, α_{16}	α_1
2	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_7$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{15}, \alpha_{17}, \alpha_{18}$	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$
3	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_7$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_9, \alpha_{18}$	α_2, α_3
4	α_2, α_4	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{16}, \alpha_{17}, \alpha_{18}$	α_2, α_4
5	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$	$\alpha_5, \alpha_7, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{17}$	α_5
6	α_6, α_7	α_6	α_6
7	α_4, α_7	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_{17}, \alpha_{18}$	α_7
8	α_4, α_8	α_8, α_{14}	α_8
9	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_9$	α_9, α_{16}	α_9
10	$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_{10}$	$\alpha_{10}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{16}, \alpha_{17}$	α_{10}
11	$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_{11}$	α_{11}	α_{11}
12	$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_{10}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$	α_{12}, α_{13}	α_{12}
13	$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_{10}, \alpha_{13}$	α_{12}, α_{13}	α_{13}
14	$\alpha_2, \alpha_8, \alpha_{14}$	α_{14}	α_{14}
15	α_2, α_{15}	α_{15}	α_{15}
16	$\alpha_1, \alpha_4, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{16}, \alpha_{18}$	α_{16}	α_{16}
17	$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7, \alpha_{10}, \alpha_{17}$	α_{17}	α_{17}
18	$\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_7, \alpha_{18}$	α_{16}, α_{18}	α_{18}

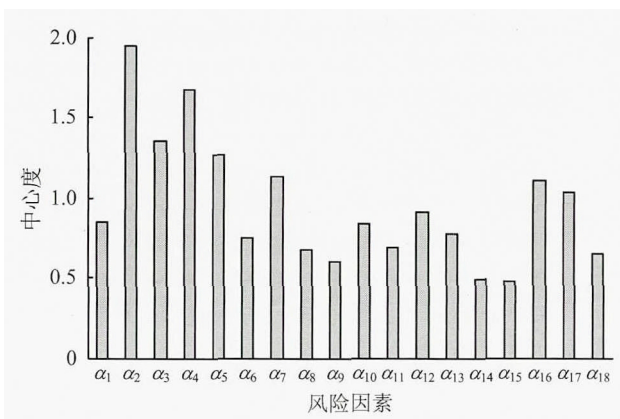


图1 可控飞行撞地风险因素重要性分析
Fig.1 Importance analysis of risk factors for CFIT

资源管理 α_7 、民航法规 α_{16} 及安全管理 α_{17} ，重要度最小的为进近灯光标志 α_{15} 和机场监视设备 α_{14} ，而通常认为重要的机载设备 α_9 、机组资历 α_1 、天气 α_{11} 、导航设备 α_{13} 、机组性格 α_6 、培训交流 α_{18} 、管制员 α_8 、飞行程序及航图品质 α_{10} 、机场净空 α_{12} 等，其风险度并不高。

在实际飞行过程中，只要飞行员提前做好充分准备，熟悉降落机场周边净空情况，飞行中准确使用航图，正确操作飞机，机组间坚持交叉检查，严格执行运行程序，就可以避免 CFIT 事故的发生，恶劣的天气与糟糕的净空在飞行程序设计

及运行程序制定的过程中已经考虑并规避。

4.2 系统多级递阶结构分析

通过构建可控飞行撞地风险因素多级递阶结构模型(见图2)，可以从整体上获得各风险因素的层次结构。第五、六层包括机场净空 α_{12} 、安全管理 α_{17} 、民航法规 α_{16} 、导航设备 α_{13} 及天气 α_{11} ，属于根源因素；第四层包括机组资历 α_1 、机组疲劳状况 α_5 、机载设备 α_9 、飞行程序及航图品质 α_{10} 、机场监视设备 α_{14} 、进近灯光及标志 α_{15} 、培训交流 α_{18} ，该层受根源因素的影响，也不同程度地影响其他因素，属于间接因素；第三层包括机组技术 α_2 、机组经验 α_3 及机组性格 α_6 ，属于直接因素，该层风险因素会导致事故征候，也即可控飞行近地(CFITT)，若在系统第二层驾驶舱资源管理 α_7 的检查或管制员 α_8 的监视下，发现了危险并告知机组，且在第一层机组较好的应急能力 α_4 下合理地处理危险，则可能避免事故，否则，将发生可控飞行撞地(CFIT)。

从可控飞行撞地风险因素多级递阶结构模型中还可以分析出每个风险因素在整个系统中的位置与重要性。如机组性格 α_6 、天气 α_{11} 、监视设备 α_{14} 、进近灯光及标志 α_{15} 与其他因素联系较少，对系统产生的影响也相对较小；而机组技术 α_2 、机组经验 α_3 、机组疲劳状况 α_5 、驾驶舱资源管理 α_7 、民航法规 α_{16} 及安全管理 α_{17} ，都处在比较重要的节点，与其他因素连接较多，对系统产生的影响也相对较大。

5 结论

飞行作为一个复杂系统，其可控飞行撞地是多项风险因

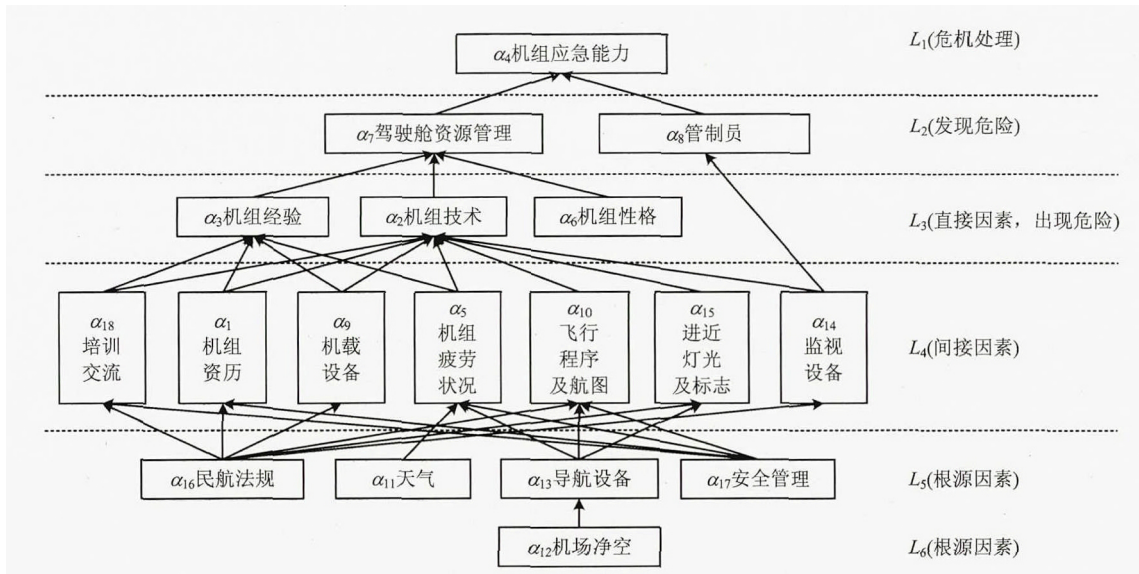


图 2 可控飞行撞地风险因素多级递阶结构模型

Fig. 2 Multilevel step-up structural model of risk factors for CFIT

素共同作用的结果。本文使用 SHEL 模型识别出 18 项风险因素,通过 DEMATEL 法得出各风险因素的重要性,其中机组技术、机组应急能力、机组经验、机组疲劳状况及驾驶舱资源管理是最重要的风险因素,原因因素中影响最大的是安全管理及民航法规。使用 ISM 算法建立了 CFIT 风险因素的多级递阶结构模型,从系统的层次结构上看,风险因素分为根源因素、间接因素、直接因素(出现危险)、发现危险及处理危险,每一层之间又有密切的关系。CFIT 风险因素的分析与系统层次结构的建立为安全管理及事故的调查提供了理论依据。

References(参考文献):

[1] DARYL R S. *Controlled flight into terrain (CFIT/CFIT)* [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2001.

[2] State Administration of Work Safety(国家安全生产监督管理总局). *Investigation report on "8·24" special major air disaster in Yichun Airport, Heilongjiang(河南航空有限公司黑龙江伊春"8·24"特别重大飞机坠毁事故调查报告)* [R]. Beijing: SAWS, 2012.

[3] WIENER E L. Controlled flight into terrain accidents: system-induced errors[J]. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1977, 19(2): 171-181.

[4] WANG Lei(汪磊), SUN Ruishan(孙瑞山). Fault tree analysis of controlled flight into terrain [C]//*Research and exploration of transportation in China: Monograph of the Sixth National Youth Conference of Traffic and Transportation(中国交通研究与探索:第六届全国交通运输领域青年学术会议论文集)*. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2005: 120-124.

[5] DU Hongbing(杜红兵), WANG Xueli(王雪莉). Cause analysis of the controlled flight bumping into terrain based on Bayesian network[J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2009, 9(5): 136-139.

[6] ZHANG Xiaoquan(张晓全), WU Guifeng(吴贵峰). Application

of FRAM model in CFIT accident analysis [J]. *Journal of Safety Science and Technology(中国安全生产科学技术)*, 2011, 7(4): 65-70.

[7] SUN Ruishan(孙瑞山), LIU Dongmei(刘冬梅), WANG Lei(汪磊). CFIT accident causation study based on correspondence analysis [J]. *China Safety Science Journal(中国安全科学学报)*, 2015, 25(2): 95-100.

[8] CHEN Ken. CFIT risk assessment model destination airport based on fuzzy linguistic [J]. *Information Technology Journal*, 2013, 12(14): 2985-2989.

[9] ZHOU Hang(周航), WANG Ying(王瑛). Renovated method of risk warning of air traffic control safety based on the SHEL model and neural network [J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2014, 14(3): 138-141.

[10] WANG Qiquan(王起全). Neural network safety assessment method for aviation enterprises based on SHEL model [J]. *China Safety Science Journal(中国安全科学学报)*, 2010, 20(2): 46-53.

[11] SUN Yonghe(孙永河), HAN Wei(韩玮), DUAN Wanchun(段万春). Review on research progress of DEMATEL algorithm for complex systems [J]. *Control and Decision(控制与决策)*, 2017, 32(3): 385-392.

[12] LIN R J. Using DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 40: 32-39.

[13] DU Chun(杜纯), WANG Ying(王瑛), WANG Song(汪送), et al. Analysis of safety accident influence factors of complex system based on the integration of DEMATEL and ISM [J]. *Mathematics in Practice and Theory(数学的实践与认识)*, 2012, 42(22): 143-150.

[14] WU Biao(吴彪), XU Hongguo(许洪国), DAI Tongyan(戴彤焱). Identifying safety factors on expressway work zone based on DEMATEL and ISM [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology(交通运输系统工程与信息)*, 2010, 10(5): 130-136.

Risk factors analysis and the system structural model investigation of the CFIT of the aircraft

YANG Shu¹, LUO Xu-feng², LI Jun-long¹

(1 College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China; 2 Aviation Accident Investigation Center of CAAC, Beijing 100028, China)

Abstract: The present paper is aimed at providing an analysis of the risk factors and a system structural model through an investigation of the air disaster known as the CFIT that took place in the Airport Yichun in the northeast of the country, which can be said a typically controlled flight into the terrain (CFIT) and bring about a serious loss and disaster to the flight. In order to explore the risk factors of the CFIT and the related interactive complicated factors, the given paper would like to make a comprehensive analysis of the Yichun air disaster through the SHELL model, which may involve quite a number of CFIT accidents and incidents so as to establish an index system of CFIT, including the 18 risk factors at the 4 levels. In accordance with the Delphi method, 15 specialists have been invited to investigate and assess the accident from the Investigation Center of the National Civil Aviation Administration and 15 senior flight instructors from the aviation front to probe into the direct influential parameters among the risk factors, so as to establish a direct influential factors of the influential matrix. And, then, systematic analysis has been done on the risk-involving factors of CFIT and the interactive mechanism has been repeatedly tested and pursued in combination with the Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) approach by using the Interpretative Structural Model (ISM), the influential degrees, the centrality and causality of the various risk-involving factors so as to establish a hierarchical model. Thus, finally, the research results demonstrate that the pilot manipulation and commanding capability, the crew-members' emergence-handling skills, their fatigue *status-in-situ*, the cockpit resource management (CRM), the civil aviation regulation and safety manipulation power should all be taken into the most important factors for the disaster evaluation. According to the research result, the obstacle around the aerodrome, the safety management, the civil aviation regulation, the navigation equipment and weather forecast inefficiency should all be taken into the root factors. In addition, the crew members' qualification, their fatigue status, airborne equipment, the flight procedures and chart quality, the aerodrome supervisory facilities, the approach lights and mark-making, the crew member training and communication skills should all be taken into the indirect factors. On the other hand, the pilot control and commanding experience and their individual characters should be taken as the direct factors, leading to the controlled flight bump onto the terrain.

Key words: safety systematics; risk structure; DEMATEL-ISM; CFIT; multilevel step-up structural model

CLC number: X949 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2018)03-0866-06

文章编号: 1009-6094(2018)03-0871-05

基于集对分析的空中交通管制运行风险评价*

赵焱飞, 万俊强

(中国民航大学国家空管运行安全技术重点实验室, 天津 300300)

摘要: 为了对空中交通管制运行风险进行有效的分析, 首先根据SHELL模型确立管制运行风险评价指标体系, 它由人的因素、硬件因素、软件因素、环境因素4个方面的17个因素组成; 使用熵权法与超标倍数赋权法综合分析确定各指标权重; 针对管制运行风险各评价指标的不确定性, 利用集对分析理论进行分析, 确定评价样本与指标之间的联系度, 并对样本进行“同一”“差异”“对立”的集对分析来确定评价样本风险等级。结果表明, 提出的集对分析模型对风险指标的处理结果与实际情况基本相符, 可以用于空中交通管制运行风险评价。

关键词: 安全工程; 空中交通管制; 风险等级; 集对分析; 熵权法; 超标倍数赋权法

中图分类号: X949 文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.009

0 引言

随着民航事业的高速发展, 航空器数量越来越多, 然而紧缺的空域资源使得空中交通不安全事故发生的概率越来越大, 当前形势对空中交通管制提出了更高的要求。空中交通管理系统对风险的管理方式也发生转变, 从先前的“事后处理”向“事前预防”过渡。空中交通管制系统监督管理着民航的安全生产, 全面、正确、客观、科学地评价空中交通管制系统的安全水平, 对各级空中交通管制部门及时准确地了解、完善管制运行安全的风险管理体系具有重要意义。

目前, 对空中交通管制系统安全性的研究集中在以下方面。2004年, Ternov等^[1]创新性地建立了基于事故的程序模型, 使用扰乱作用障碍分析法分析了空中交通管制运行风险。2008年, Shyur^[2]首次使用建立比例风险模型的方法对航空事故和安全指标进行了分析, 确定由人为失误造成的安全风险事故。2009年, 王洁宁等^[3]对空管不安全事件的人为差错分析时最早使用本体建模方法。王永刚等^[4]在确定管制员人为差错的影响因素时利用模糊层次分析法确定指标权重。2013年, 罗帆等^[5]对空中交通管制安全风险进行预警分析时最先引入决策理论。2014年, 周航等^[6]开创性地使用神经网络与遗传算法相结合的方法对管制员人为差错风险进行了评估。

由于空中交通管制安全系统的复杂性, 在对各因素的安全性进行评估时有很多的不确定性。当前使用的评价方法比

* 收稿日期: 2017-05-12

作者简介: 赵焱飞, 教授, 从事空中交通规划与管理研究, yifei6666@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1633112, U1533112); 科技部国家重点研发计划项目(2016YFB0502400)