

文章编号: 1009-6094(2021)02-0506-07

# 基于改进 DEMATEL-ISM 模型的机轮刹车系统 风险因素分析\*

贾宝惠 史思杨 王玉鑫

(中国民航大学航空工程学院 天津 300300)

**摘要:** 针对机轮刹车系统在飞机着陆阶段复杂的安全性问题,应用系统理论过程分析法(STPA)识别潜在风险因素,采用风险熵改进决策实验室分析法(DEMATEL)计算风险因素中心度和原因度,确定因素重要性和属性,并集成解释结构模型法(ISM)建立风险因素递阶层次结构。结果表明:在因素辨识方面,STPA与传统FTA方法相比,可识别出更多的风险因素,如组件交互、设计缺陷等因素;通过改进DEMATEL-ISM可体现系统因素客观联系,并确定AACU为系统关键部件,且风险因素可分为3个层次,在层次内与层次间均存在因素关联,从递阶层次结构分析得出可采取断链措施和提高部件可靠性来保障系统安全。

**关键词:** 安全工程;机轮刹车系统;STPA;风险熵;DEMATEL-ISM;递阶层次结构

中图分类号: X949 文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0802

## 0 引言

机轮刹车系统(Wheel Brake System, WBS)是保障飞机安全起飞、着陆的关键机载系统,是典型的人机交互、软硬件结合及多种信息融合的复杂系统<sup>[1]</sup>。这使得运行过程中影响系统安全的因素复杂且关联性强,因此进行WBS运行安全事件的风险因素辨识及因素关联性分析对预防事故发生具有重要的工程意义。

目前,国内外学者针对系统安全性分析的研究主要是基于故障链的影响因素识别和暂态概率评估。在因素识别方面,陈云霞等<sup>[2]</sup>采用FTA(Fault Tree Analysis)分析了无人机机轮刹车系统典型故障模式,从定性和定量的角度确定了系统产生故障的因素组合及其发生概率。2015年,陆正等<sup>[3]</sup>针对飞机冲出跑道不安全事件,首次结合Reason和SHEL模型改进了Bow-tie模型,清晰地揭示了事故原因与后果的关联性。冯蕴雯等<sup>[4]</sup>基于民航事故统计确定

起落架故障模式,该方法易遗漏其他潜在风险因素,使分析结果不准确。上述研究均基于部件失效角度识别风险因素,难以解释人的行为、软件错误及组件交互等非线性问题。2004年,Hollnagel<sup>[5]</sup>首次提出功能共振模型(FRAM),虽强调了组件之间的相互作用,但仅针对性能正常变化引起的事故,忽视了性能异常或无变化、需求缺陷等因素的影响。在风险因素关联性方面的研究较少,杜雷等<sup>[6]</sup>使用自相关矩阵表示因素间的关系,但未考虑因素间的间接影响关系。目前文献普遍采用集成决策实验室分析法(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)和解释结构模型法(Interpretative Structural Modeling, ISM)分析复杂系统因素间的关联性。汪送<sup>[7]</sup>在识别复杂系统安全事故的致因因素后,阐述了集成DEMATEL-ISM方法进行因素分析的算法步骤。陆军平等<sup>[8]</sup>应用DEMATEL-ISM对矿井通风系统影响因素进行分析,结果表明,影响因素的相关度可以反映影响因素的内在联系和因果传递方向。但这些研究均以专家评价确定因素关系,主观性较强,且结果不稳定。

本文采用系统理论过程分析方法(System Theoretic Process Analysis, STPA)识别系统中的风险因素。为克服DEMATEL方法的主观性,以风险熵衡量因素间的关联程度,改进DEMATEL方法并综合ISM方法确定系统关键因素,建立风险因素递阶层次结构,分析风险因素间的内在关联,以期WBS的维护及事故预防提供决策参考。

## 1 基于STPA的机轮刹车系统风险因素辨识

2004年,Leveson<sup>[9]</sup>首次提出了STPA方法,该方法基于系统论与控制论对事故进行安全性分析,认为事故的发生是由于缺乏恰当的安全约束,强调多个组件间的交互作用,能够较完整地识别出事故致因,已被广泛应用于各个领域。STPA方法分析流程见图1。

### 1.1 系统级事故和危险定义

事故定义为致使人员伤亡疾病、设备破坏、财产

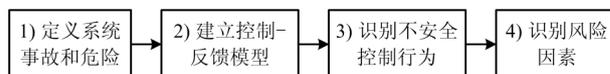


图1 STPA分析流程

Fig. 1 STPA analysis process

\* 收稿日期: 2019-07-19

作者简介: 贾宝惠,教授,从事维修工程分析与系统安全性分析研究, jiabaohui@sina.com。

损失和环境恶化等不期望事件<sup>[10]</sup>。从目前运营情况来看,飞机系统导致的事故包括人员伤亡  $A_1$ 、飞机损毁  $A_2$  及地面设施受损  $A_3$ 。系统级危险为导致系统事故的状态或条件,其在特定环境下可能会引发多个事故的发生<sup>[1]</sup>。在飞机着陆过程中,导致事故发生的危险场景可能有: 1) 由于减速不足致使飞机冲出跑道  $H_1$ , 从而导致事故  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ ; 2) 飞机运行过程中失控而与其他地面设施发生碰撞或偏出跑道  $H_2$  致使事故  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ ; 3) 刹车系统故障或其他系统机械故障等原因使得飞机停在安全区域外,阻碍其他飞机和设备的正常运行  $H_3$ , 可能发生碰撞,导致事故  $A_1$  和  $A_2$ 。因此在着陆过程中,系统级危险主要包括  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$ 。

与 WBS 最相关的危险是飞机由于减速不足而冲出跑道  $H_1$ , 因此本文以  $H_1$  为例说明 STPA 在系统安全性分析中的优势和适用性。

### 1.2 WBS 控制-反馈模型建立

本文以 B737-NG 系列飞机的 WBS 正常刹车模式(人工和自动刹车)为例,首先需要飞行员设置刹车参数、选择刹车方式。自动刹车时,飞行员通过自动刹车选择电门预位刹车压力,该输入信号经防滞/自动刹车控制组件(AACU)处理,发送到自动刹车压力控制组件(V122),V122 根据压力信号计量刹车压力,然后自动刹车往复活门将计量的压力与人工刹车压力比较后传到刹车作动筒。同时,飞行员也可通过脚蹬经钢索作用于液压刹车系统进行人工刹车。在刹车过程中,传感器可监测与系统运行相关的状态参数,并在仪表上显示。由此可见,机轮刹车系统主要由飞行员、AACU、V122、液压刹车系统、传感器等组成,相互之间存在逻辑和功能上的控制与反馈关系<sup>[1]</sup>。

因此,根据 WBS 在着陆阶段的运行原理和组件间的控制关系构建包含控制行为和反馈信息的系统模型(以下称为控制-反馈结构模型),见图 2。图 2 中左半部分 I 为主动控制,右半部分 II 为反馈。

### 1.3 不安全控制行为识别

本文仅考虑 WBS,忽略环境和飞行员个体差异等外界因素的影响。在飞机着陆过程中,主要的控制行为有设置刹车减速率、刹车指令传输、刹车模式选择等,其行为的控制器有飞行员、AACU、V122。STPA 定义了 4 种不安全控制行为<sup>[9]</sup>: 1) 没有提供控制行为; 2) 提供了产生危险的控制行为; 3) 提供的控制行为过早或过晚; 4) 提供控制行为的作用时间过长或过短。以 AACU 发送刹车指令进行不安全控制行为(Unsafe Control Action, UCA) 示例说明,见表 1。

### 1.4 不安全控制行为的致因确定

在确定了不安全控制行为之后,需要进一步分析产生 UCA 的原因。根据图 2 的控制-反馈模型,STPA 方法将 UCA 的危险致因分为两类: 1) 控制行为的不恰当执行; 2) 反馈信息不正确或缺失。逐一找出相应的 UCA 产生的原因。由于篇幅有限,仅以 AACU.1 为例,结果见表 2。

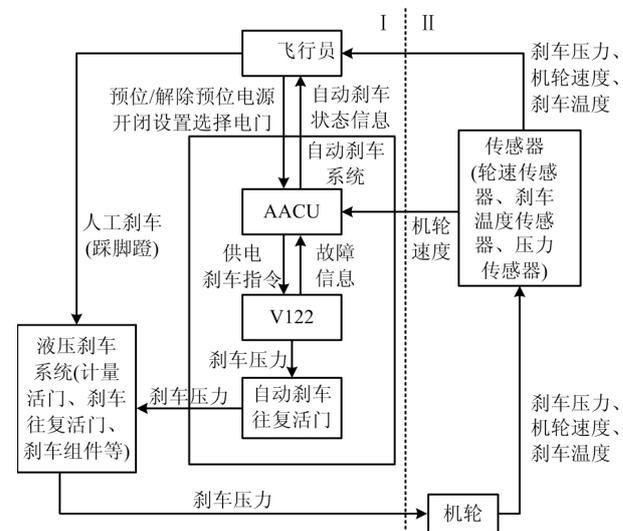


图 2 机轮刹车系统的控制-反馈结构模型

Fig. 2 Control-feedback structure model of the wheel brake system

表 1 AACU 发送刹车指令的不安全控制行为

Table 1 Unsafe control action of AACU transferring brake command

控制行为	未提供控制行为	提供了危险的行为	太早、太晚或无序	作用时间过长或过短
AACU 发送自动刹车指令	AACU. 1: 在着陆期间, 已预位自动刹车, 但 AACU 未提供刹车指令, 导致飞机失控冲出跑道 [ $H_1, H_2, H_3$ ]	AACU. 2: AACU 处理发送的减速指令不足, 导致减速不充分 [ $H_1, H_3$ ]	AACU. 3: 在触地后超过规定时间实施刹车命令, 导致减速不足 [ $H_1, H_3$ ]	AACU. 4: 在达到滑行速度之前, 停止刹车指令, 导致减速不充分 [ $H_1, H_3$ ]

参考文献 [2] 的 FTA 方法,分析 AACU 导致飞机冲出跑道的的原因,并与表 2 对比验证 STPA 方法的有效性。FTA 分析结果见图 3,与表 2 对比可以看出: FTA 只识别出了 AACU 监控通道、电源故障等组件失

效类因素; STPA 分析结果不仅包含上述因素,还涵盖其他 3 种风险因素。由此说明,STPA 能更好地处理软件及人参与的复杂系统,识别出较完整的风险因素。

根据 STPA 的分析流程可以得到机轮刹车系统中导致飞机冲出跑道的风险因素,见图 4。

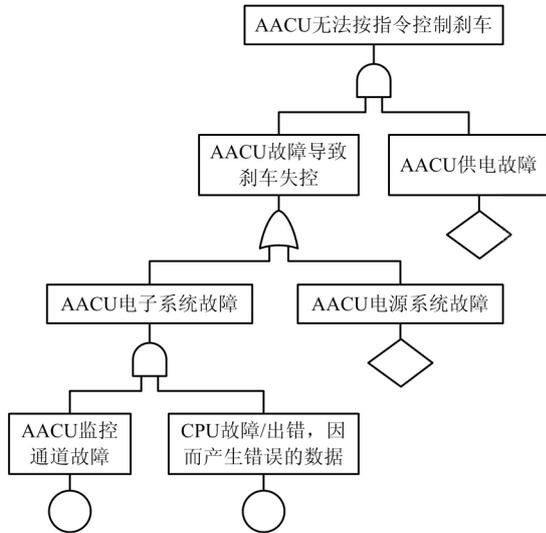


图 3 AACU 导致飞机冲出跑道的 FTA 分析  
Fig.3 FTA analysis of AACU causing aircraft to run off the runway

## 2 风险因素相关性分析

### 2.1 改进 DEMATEL 方法的因素分析

DEMATEL 方法是一种基于图论和矩阵论进行复杂系统因素分析的有效方法,已在许多领域得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>。通常 DEMATEL 以专家打分确定因素关系,构建直接影响矩阵  $B$ ,计算中心度和原因度确定因素重要性和属性。但该方法确定的因素关系主观性较强,因素间关联强度不准确。因此考虑采用风险因素发生概率  $P_{ij}$  体现两因素的联系及关联强度,其中  $P_{ij}$  表示因素  $i$  导致因素  $j$  发生的概率。风险因素发生概率在某种意义上代表因素间联系的不确定性,表现为设备失效的随机性及人为操作、组件交互等的模糊性。香农以信息熵表征信源的不确定性<sup>[13]</sup>,对于发生概率为  $P(x_i)$  的事件  $x_i$ ,其不确定

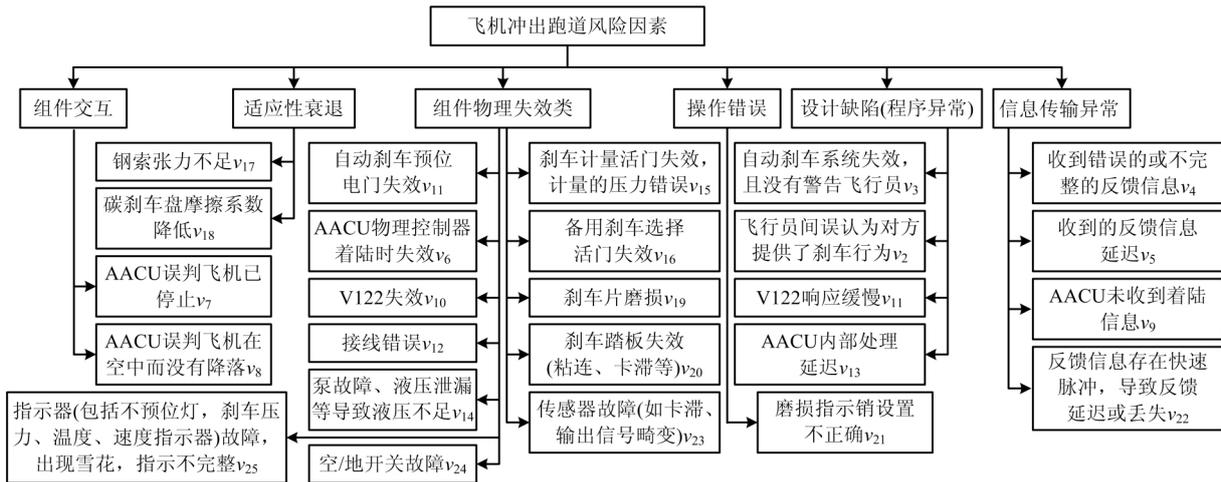


图 4 飞机冲出跑道风险因素  
Fig.4 Risk factors for aircraft rushing out of the runway

表 2 AACU.1 不安全控制行为产生原因

Table 2 Reasons for AACU.1 unsafe control action

UCAs	风险因素	因素类别
AACU.1	1) AACU 物理控制器着陆时失效	组件失效
	2) AACU 误判飞机已停止(防滞时速度暂时指示 0)	组件交互
	3) AACU 误判飞机在空中而未降落	组件交互、程序异常
	4) AACU 未收到着陆信息	程序异常、信息传输异常
	5) AACU 与飞行员、传感器、V122 等的信息传输通道失效或有缺陷	组件失效、信息传输异常

性度量

$$I(x_i) = -\ln P(x_i) \quad (1)$$

因此可借鉴香农熵衡量风险事件发生的不确定性,定义为风险熵,以此改进 DEMATEL 方法,具体分析步骤如下。

1) 基于 STPA 识别出 WBS 风险因素  $v_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,  $v_i \in V$ ,  $V$  为系统风险因素集合。

2) 参考信息熵定义,以风险熵表示事件发生的不确定性,构建如下直接影响矩阵  $B$ 。

$$B = \begin{pmatrix} 0 & -\ln P_{12} & \dots & -\ln P_{1n} \\ -\ln P_{21} & 0 & \dots & -\ln P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\ln P_{n1} & -\ln P_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

3) 正规化处理直接影响矩阵  $B$ ,得到规范化直接影响矩阵  $C (C = (c_{ij})_{n \times n})$ ,使得  $0 < c_{ij} < 1$ 。

$$c_{ij} = \frac{-\ln P_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_i (-\ln P_{ij})} \quad (3)$$

4) 由于矩阵  $C$  只体现了因素间的直接影响,根据式(4)运用 Matlab 软件对  $C$  编程,可得到包含直接和间接影响的综合影响矩阵  $T (T = (t_{ij})_{n \times n})$ 。

$$T = \lim_{n \rightarrow \infty} (C + C^2 + \dots + C^n) = C(I - C)^{-1} \quad (4)$$

式中  $I$  为单位矩阵。

5) 确定因素重要性和属性。中心度  $M_i$  表示该因素的位置和所起的作用大小,用来评估因素重要性,可经式(5)计算得到,其值越大,则该因素越重要;因素属性由原因度  $N_i$  表示,可由式(6)计算:若为正,表明该因素关联性强,定义为原因因素;若为负,则为结果因素。

$$M_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

根据计算结果,将中心度  $M_i$  进行排序,可确定关键风险因素;由原因度  $N_i$  的正负性确定风险因素属性,得出结果因素和原因因素。

### 2.2 风险因素递阶层次结构构建

ISM 方法可分析因素众多且层次结构混乱的系统<sup>[14]</sup>,将 DEMATEL 与 ISM 结合可实现有效互补,是构建因素递阶层次结构的可行方法。ISM 模型在 DEMATEL 方法的基础上考虑因素自身影响构成整体影响矩阵  $H$  (式(7));以给定阈值  $\varepsilon$  对矩阵  $H$  中的因素进行筛选得到可达矩阵  $K$  (式(8)),保留影

响程度较大的因素,使递阶层次结构更清晰。在可达矩阵中,将风险因素  $v_i$  所在的行和列之和称为节点度。 $\varepsilon$  可凭经验多次取值分析,以节点度适中为原则。再由式(9)确定可达集合  $R_i$  与前因集合  $S_i$ ,并由式(10)对矩阵  $K$  进行级间划分。

$$H = I + T \quad (7)$$

$$\begin{cases} k_{ij} = 1 & h_{ij} \geq \varepsilon \\ k_{ij} = 0 & h_{ij} < \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

$$R_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ij} = 1\} \quad (9)$$

$$S_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ji} = 1\} \quad (10)$$

$$R_i = R_i \cap S_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

若  $R_i$  和  $S_i$  满足式(10),则在矩阵  $K$  中划除第  $i$  行和第  $i$  列。循环式(9)和(10),直到划除所有因素。根据因素被划除的顺序,绘制递阶层次结构图,分析因素的内在关联和结构性。

### 3 算例分析

以某型飞机 WBS 为例,分析并验证改进的 DEMATEL-ISM 方法的有效性和可行性。收集 WBS 不安全事件发生的概率数据:对于随机因素,可通过查询历史数据库得到设备或部件的失效率,经可靠性计算得到概率;模糊因素可由专家评价以梯形模糊数表示,经模糊计算得到模糊概率<sup>[15]</sup>。数据来源主要有:1) 供应商可靠性数据库;2) 电子设备可靠性估计 MIL-HDBK-217FPlus;3) 专家评价。

#### 3.1 计算过程与分析

通过上述方法获取基本数据,根据式(2)建立直接影响矩阵  $B$ ,再由式(3)~(6)进行计算,结果见表3。其中,中心度较大节点定义为关键节点,4个关键节点依次为  $v_9, v_{22}, v_4, v_8$ ,而  $v_9$  和  $v_8$  为结果因素,  $v_{22}$  和  $v_4$  为原因因素。

根据式(8),分别取  $\varepsilon$  为 0.007、0.013、0.018、0.023 和 0.035,可得到 5 个不同的可达矩阵  $K$ ,计算各节点度,结果见图5。当  $\varepsilon=0.018$  时,节点度适中。图6为  $\varepsilon=0.018$  时节点度变化曲线,节点度较大的节点  $v_9$  在 DEMATEL 方法确定的关键节点域内。因此,本文选取  $\varepsilon=0.018$  确定可达矩阵  $K$ 。然后结合式(9)和(10)可构建如图7所示的风险因素递阶层次结构。

由图7可知  $v_1 \sim v_3, v_7, v_8, v_{24}$  及  $v_{13} \sim v_{19}$  为近邻致因,  $v_6, v_{12}, v_{22}, v_{23}$  和  $v_{25}$  为本质致因,其余节点为过渡致因。

#### 3.2 计算结果与分析

结合表3和图7可知, AACU 未收到着陆信号

表 3 改进的 DEMATEL 计算结果

Table 3 Summary of improved DEMATEL calculations

风险因素	中心度	原因度	中心度排序	因素属性
$v_1$	0	0	21	原因
$v_2$	0.763 6	-0.763 6	7	结果
$v_3$	0.927 9	-0.927 9	6	结果
$v_4$	1.303 0	0.697 0	3	原因
$v_5$	0.969 0	0.027 0	5	原因
$v_6$	0.626 7	0.593 7	9	原因
$v_7$	0.726 7	-0.726 7	8	结果
$v_8$	1.229 8	-1.229 8	4	结果
$v_9$	1.703 0	-0.545 0	1	结果
$v_{10}$	0.409 0	0.343 0	15	原因
$v_{11}$	0.616 0	0.550 0	10	原因
$v_{12}$	0.251 7	0.199 1	19	原因
$v_{13}$	0.602 2	-0.602 2	12	结果
$v_{14}$	0	0	21	原因
$v_{15}$	0	0	21	原因
$v_{16}$	0	0	21	原因
$v_{17}$	0.399 0	-0.399 0	16	结果
$v_{18}$	0	0	21	原因
$v_{19}$	0.422 0	-0.422 0	13	结果
$v_{20}$	0.399 0	0.399 0	16	原因
$v_{21}$	0.422 0	0.422 0	13	原因
$v_{22}$	1.378 2	1.378 2	2	原因
$v_{23}$	0.375 8	0.375 8	18	原因
$v_{24}$	0.025 3	0.025 3	20	原因
$v_{25}$	0.606 0	0.606 0	11	原因

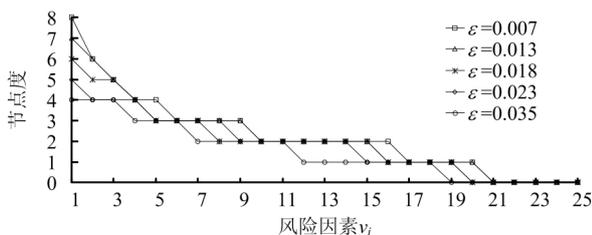


图 5 不同  $\epsilon$  下因素节点度衰减散点图

Fig. 5 Separation scatter plot of node degree under different  $\epsilon$

$v_9$  不仅具有较大的节点度,而且作为结果因素处于递阶层次结构的过渡层,与上下两层存在明显关联。

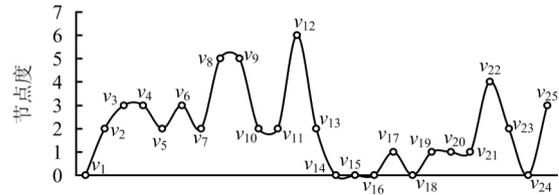


图 6  $\epsilon = 0.018$  时节点度变化曲线

Fig. 6 Curve of node degree change when  $\epsilon = 0.018$

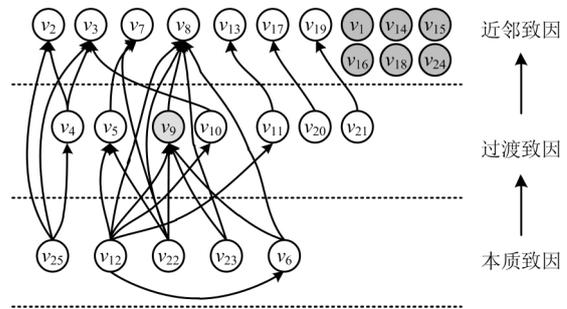


图 7 风险因素递阶层次结构

Fig. 7 Hierarchical structure of risk factors

这是因为自动刹车在着陆阶段起着主要作用,若 AACU 自动控制器未收到刹车指令,导致其无输出压力信号,其他部件也均无响应,最终无刹车而冲出跑道。同时,由于 AACU 可接收运行状态信号、飞行员输入信号,具有自动控制决策的权限,致使 AACU 发生失效的途径较多,控制难度大。因此在运营过程中应加强 AACU 控制器的检查维护、定期调试和更新控制程序。

图 7 中处于近邻层的节点  $v_1$ 、 $v_{14}$ 、 $v_{15}$ 、 $v_{16}$ 、 $v_{18}$  和  $v_{24}$  没有与之关联的边,过渡层的  $v_{20}$ 、 $v_{21}$  无输入边,这些因素为部件物理故障,与可靠性和维修性有关,因此提高其可靠性和维修性可有效避免事故的发生。AACU 失效  $v_6$ 、接线错误  $v_{12}$ ,以及与反馈相关的  $v_{22}$ 、 $v_{23}$  和  $v_{25}$  均处于本质致因层,因该型飞机的 WBS 主要为电动液压式刹车,存在复杂的电子连接通路,若接线出现问题则可导致电子控制器 AACU 失效及反馈通路信息传输错误,这与  $v_{12}$  具有最大节点度结果一致,同时系统中状态信息反馈不足(如  $v_{22}$ 、 $v_{23}$ 、 $v_{25}$ )会影响自动控制器的判断以致误操作。虽控制本质致因不会立即有明显成效,但这些因素具有最大的影响面,应予以足够的重视。

综上分析可知,以风险因素发生概率表征关联程度,能够客观地反映系统中的因素联系,提出符合实际的事故预防建议;并将其转化为风险熵,既体现

风险传递的不确定性,又简化计算,以合理阈值保留具有重要意义的影响因素,使结果更符合工程实际。仅以专家打分确定的因素关系极可能忽视某些重要因素或强调不必要联系,因素关系表征不准确。由此表明,改进的 DEMATEL-ISM 方法具有一定的可行性和有效性。

#### 4 结论

1) 使用 STPA 识别出的风险因素既包含传统 FTA 分析结果,还涵盖组件交互、设计缺陷等其他 5 类风险因素,这些因素并不只是组件自身的故障或失效,而是运行过程中组件间的不恰当交互,或自身设计时并未考虑这些干扰,运行时无应急处理程序,导致危险的发生。由此表明在因素辨识方面,STPA 比 FTA 针对同一事件能识别更多的风险因素,可有效弥补现有危险识别技术的不足。

2) 以风险熵改进 DEMATEL 方法可得到较客观的因素关系,与 ISM 模型集成的计算结果可为预防事故提供符合工程实际的指导建议。由中心度计算得出 AACU 为系统最关键部件,与实际运营情况一致。构建的递阶层次结构表明:对于系统中多因素的连锁效应,可采取断链措施来避免事故发生;对于组件物理故障类因素,可提高其可靠性和维修性来保障系统持续安全性。

#### References(参考文献):

- [1] HU Jianbo, ZHENG Lei, XU Shukui. Safety analysis of wheel brake system based on STAMP/STPA and Monte Carlo simulation [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(6): 1327-1339.
- [2] CHEN Yunxia(陈云霞), GUAN Lixiang(关理想), GONG Fang(巩芳). Wheel brake system analysis of unmanned aerial vehicle based on FTA [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology* (机电工程技术), 2012, 41(7): 115-117.
- [3] LU Zheng(陆正), CUI Zhenxin(崔振新), WANG Lei(汪磊). Civil aircraft landing overrun risk analysis based on Bow-tie model [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection* (工业安全与环保), 2015, 41(12): 4-8.
- [4] FENG Yunwen(冯蕴雯), ZHU Zhengzheng(朱铮铮), YAO Xionghua(姚雄华), et al. An effective safety analysis method of civil aircraft landing gear [J]. *Journal of Northwester Polytechnical University* (西北工业大学学报), 2016, 34(6): 969-975.
- [5] HOLLNAGEL E. *Barriers and accident prevention* [M]. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Limited, 2004.
- [6] DU Lei(杜雷), GAO Jianmin(高建民), CHEN Kun(陈琨). Reliability deployment based on fault correlation analysis [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* (计算机集成制造系统), 2011, 17(9): 1973-1980.
- [7] WANG Song(汪送). Modelling analysis of complex system accident causation network [J]. *China Safety Science Journal* (中国安全科学学报), 2013, 23(2): 109-116.
- [8] LU Junping(陆军平), YU Junqi(于军琪), YANG Honggang(杨宏刚). Analysis of factors affecting vulnerability of mine ventilation system based on DEMATEL and ISM [J]. *Coal Technology* (煤炭技术), 2018, 37(8): 152-154.
- [9] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems [J]. *Safety Science*, 2004, 42(4): 237-270.
- [10] *Standard practice for system safety: MIL-STD-882D* [S]. Washington D. C.: Department of Defense, 1993.
- [11] WANG Jiening(王洁宁), ZHANG Congjun(张聪俊). A quantification model for controlling human errors resulting from the runway excursion of the aircraft [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2019, 19(1): 112-119.
- [12] SINGHAL D, TRIPATHY S, JENA S K. DEMATEL approach for analyzing the critical factors in remanufacturing process [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(9): 18568-18573.
- [13] HU Ruimin(胡瑞敏), LÜ Haitao(吕海涛), CHEN Jun(陈军). Risk evaluation model of security and protection network based on risk entropy and Neyman-Pearson criterion [J]. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2014, 40(12): 2737-2746.
- [14] CHU Xuxin(初旭新), ZONG Gang(宗刚), PENG Zhaoxia(彭朝霞), et al. Analysis of the key influential factors on the road traffic safety based on the interpretive structural model [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2017, 17(5): 1668-1672.
- [15] DONG Haibo(董海波), GU Xuekang(顾学康). Probability calculation of blowout of drilling platform based on fuzzy fault tree method [J]. *Shipbuilding of China* (中国造船), 2013, 54(1): 155-165.

## Risk factors analysis of the wheel brake system based on the improved DEMATEL-ISM

JIA Bao-hui, SHI Si-yang, WANG Yu-xin

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aiming at the complex and complicated safety problems of the wheel brake system (WBS) during the landing stage, we have done an analysis on the safety of the operational stage to identify the risk factors and determine their relations. To achieve the purpose, first of all, we have adopted the system theory process analysis (STPA) to identify the safeless or reckless control activities concerning the risk factors by building up a control-feedback structure model under the control relations and the operational principles. And, then, we have managed to change the risk entropy to characterize the uncertainty with the probability of the event occurrence of the direct influential matrix in the decision making trial and the evaluation laboratory (DEMATEL). According to the improved DEMATEL-ISM, the centrality degree, cause degree and the order of the centrality degree can be obtained to confirm the causal relevance and the key indexes. And, finally, on the above series of analyses, it would be necessary to integrate the interpretive structural model (ISM) to gain the reachable set and the forward set under the given threshold, as well as to gain their intersection set. As to the intersection set, the reachable matrix can also be set up to build up a system hierarchical structure to reflect the intrinsic and hierarchical relation of the factors concerned graphically. The results of the above study can indicate that, as compared with the FTA, the STPA can help to identify and determine more risk-leading factors besides the component failure, such as the interactive factors and the designing defects. Through the above said improved DEMATEL with ISM, the objective relation of the system factors can be effectively reflected and clarified. At the same time, the AACU can be confirmed as the key component, which should have the greatest impact on the system safety. In the mean time, the risk factors can be divided into 3 levels to reflect the relation in and out of the hierarchical system. From the hierarchical structure above mentioned, it can be seen that the system safety can be guaranteed and ensured by taking measures to break the chain and heighten the component reliability.

**Key words:** safety engineering; wheel brake system; STPA; risk entropy; DEMATEL-ISM; hierarchy structure

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

**Article ID:** 1009-6094(2021)02-0506-07

文章编号: 1009-6094(2021)02-0512-09

## 深基坑施工风险评估的模糊证据推理方法\*

魏道江<sup>1</sup> 张勇<sup>2</sup> Min An<sup>3</sup>

- (1) 湖北文理学院土木工程与建筑学院, 湖北襄阳 441053;
- (2) 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055;
- (3) 索尔福德大学建筑环境学院, 英国曼彻斯特 M5 4WT)

**摘要:** 为了克服既有深基坑施工风险评估方法不能对风险评估结果进行信度评价的局限性, 提出了一种将证据推理与模糊集理论相结合的风险评估方法。首先, 以《地铁及地下工程建设风险管理指南》为依据, 将风险定义为风险事件发生概率与损失程度的乘积并统一用梯形模糊数表示。针对指南中同一风险等级对应多个风险组合值的弊端, 通过取有效组合的处理方法, 建立风险等级与隶属函数的一一对应关系。然后, 将深基坑施工风险事件的风险水平视为反映深基坑整体风险水平的证据, 通过对事件风险水平进行置信结构转换及证据融合, 得到能够反映不同可信度水平的基坑整体风险评估值。工程实例表明, 运用该方法对深基坑施工风险进行评估不但可以反映基坑被判为某一风险等级的信度, 而且能够根据全局权重及置信结构分布较容易地找出影响基坑总体风险水平的关键因素, 进而为有针对性地采取风险控制策略提供依据。

**关键词:** 安全工程; 深基坑; 风险评估; 模糊集理论; 证据推理  
中图分类号: X947 文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.1164

## 0 引言

风险评估是深基坑施工安全风险管理的一项重要内容, 评估结果的客观与否不仅关系到风险控制决策的有效性, 也关系到整个项目管理活动的成败<sup>[1]</sup>。由于深基坑施工具有环境不确定性和信息不完全性等特点, 以往学者们对深基坑施工风险评估的研究通常采用模糊评价的方法, 比较有代表性的成果有基于模糊评判理论的风险评价模型<sup>[2-4]</sup>、基于贝叶斯网络的模糊综合评价模型<sup>[5]</sup>、模糊层次分析模型<sup>[6-7]</sup>等。然而, 采用既有的风险评估方法仅能得

\* 收稿日期: 2019-08-28

作者简介: 魏道江, 副教授, 博士, 从事地下工程施工风险控制研究, 295419709@qq.com。

基金项目: 湖北文理学院学科开放基金项目 (XK2020052); 陕西省重点研发计划项目 (2018ZDXM-SF-096)