

文章编号: 1674-8190(2023)01-047-10

民用飞机持续安全性评估体系架构设计与分析

贾宝惠¹, 杨丽晨², 王玉鑫¹

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

(2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 民用飞机运营阶段安全性评估过程涉及多系统的能力整合与交互, 目前我国缺乏基于标准规范的系统化持续安全性评估体系。基于美国国防部体系结构框架(DoDAF), 通过统一建模语言(UML)从多视角出发设计并构建民用飞机持续安全性评估体系架构, 给出持续安全性评估控制链顶层的全面描述; 在此基础上, 引入复杂网络理论对体系架构整体性能进行评估, 提出综合考虑节点中心性及网络鲁棒性的重要度评价指标用于识别体系中关键节点, 并对关键节点进行设计优化。结果表明: 本文设计的民用飞机持续安全性评估体系架构整合了多系统资源和能力, 明确了系统控制流程及系统间交互, 对关键节点进行优化后的体系架构稳定性增强, 能够为运营阶段的安全性评估和管理提供指导。

关键词: 持续安全性评估; 体系架构; DoDAF; 复杂网络

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.05

Design and analysis of ongoing safety assessment system architecture of civil aircraft

JIA Baohui¹, YANG Lichen², WANG Yuxin¹

(1. School of Transport Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The safety assessment process of civil aircraft during the operational phase involves the integration and interaction of the capabilities of multiple systems. The systematic ongoing safety assessment system based on standard specifications is lacked in China currently. A system architecture for civil aircraft ongoing safety assessment is designed and built from multiple perspectives, which is based on the US Department of Defense architecture framework (DoDAF) and unified modeling language (UML), and the comprehensive description of the top level of the control chain for ongoing safety assessment is given. On this basis, the complex network theory is introduced to evaluate the overall performance of the architecture. The importance evaluation index is proposed by considering the node centrality and network robustness to identify the key nodes, and the key nodes are performed with design and optimization. The results show that the designed civil aircraft ongoing safety assessment architecture can integrate the resources and capabilities of multiple systems, clarify the system control process and the interaction between systems, and enhance the stability of the architecture after optimization of key nodes, which can provide the guidance for safety assessment and management during the operational phase.

Key words: ongoing safety assessment; system architecture; Department of Defense architecture framework (DoDAF); complex network

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(U2033209)

通信作者: 杨丽晨, Yanglc_1997@163.com

引用格式: 贾宝惠, 杨丽晨, 王玉鑫. 民用飞机持续安全性评估体系架构设计与分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 47-56.

JIA Baohui, YANG Lichen, WANG Yuxin. Design and analysis of ongoing safety assessment system architecture of civil aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 47-56. (in Chinese)

0 引言

对民用运输类飞机而言,保证其持续安全飞行一直是行业关注的重点。截至 2021 年底,我国运输航空器实现了持续安全飞行“120+16 个月”、9 876 万小时,安全技术水平达到了世界前列。为了提高飞机全生命周期内的安全性,仅在设计阶段评估飞机的安全性是不够的,也应该对在役阶段的安全性进行评估^[1]。为此,美国汽车工程师协会发布了《商用运输类飞机的安全性评估指南》(ARP 5150)^[1],为民航体系内各利益攸关方提供了持续安全性评估的顶层标准。然而,由于国产民用飞机事业起步相对较晚,加之缺乏民用飞机运营经验^[2],基于有效的标准规范形成系统化的安全性管理和运营支持体系鲜见。针对以保持飞机运营过程中的安全性为任务导向的评估体系,需要以 ARP 5150 顶层标准为基础,将多方资源和能力进行整合、功能开发和交互,从而达到对民用飞机进行系统化的持续安全性评估的目的。

美国国防部体系结构框架(Department of Defense architecture framework,简称 DoDAF)^[3],作为目前最权威的体系架构设计标准之一,已被广泛用于企业架构^[4]、作战体系^[5]、飞行器设计^[6]及航空运输^[7]等多个领域,它提供了一个体系架构的标准建模框架,从多视角描述并整合系统组件及功能。民用飞机持续安全性评估过程涉及多利益攸关方及多系统交互,仅从单一角度描述系统控制流程无法形成全面的系统体系架构,而 DoDAF 中所包含的不同视角下的多种视图模型可以对系统的组织结构、系统间信息流交互以及系统内部控制流等进行全面描述,为建立统一的民用飞机持续安全性体系架构提供了可能。

然而,现有研究中 DoDAF 的应用主要使用统一建模语言(Unified Modeling Language,简称 UML)完成视图模型的构建,而 UML 模型缺乏形式化规范,使得无法对构建的体系架构进行有效评估。针对 UML 模型难以评估的问题,有些研究将 UML 模型转换为网络模型,例如工作流网络^[8]、演员网络理论^[9]和叙事网络^[10-11]等,利用中心性^[12]、鲁棒性^[13]等网络特性指标对 UML 模型进行评估。通过对网络模型进行分析可以更加直观地描述 UML 模型控制流中各操作间的交互关系,但将网络分析用于对体系架构的整体性能评估,还

需要针对体系架构特点提出更为有效的评价指标。

本文针对民用飞机持续安全性评估,设计一种基于 DoDAF 的民用飞机持续安全性评估体系架构,使用 UML 构建 DoDAF 中的视图模型,给出持续安全性评估控制链顶层的全面描述;针对体系结构特点结合复杂网络的中心性及鲁棒性分析提出节点重要程度的评价指标,对体系架构特定节点及整体性能进行分析和评估。

1 体系结构设计与分析

1.1 DoDAF 体系架构设计方法

DoDAF 是目前应用最广泛的体系架构设计标准,以元模型(DoDAF Meta-Model,简称 DM2)作为 DoDAF 整体架构中的核心数据模型,在保证各系统间数据语义一致性的同时,开发与用户需求数据映射的系统架构模型。

DoDAF 中定义一种表示体系架构的方法——视图模型,分别从 8 个视角出发规定 52 个视图模型,包括全视图、数据与信息视图、标准视图、项目视图、操作视图、能力视图、服务视图和系统视图^[3]。该模型从不同角度对系统架构数据模型进行逻辑分组,由于各视角之间存在着逻辑上的一致性和完备性,因而可以共同描述一个完整的系统架构。

1.2 复杂网络体系架构分析

复杂网络作为复杂系统的抽象表示,其拓扑结构可以更加直观地表述复杂系统具有的本质特征。复杂网络的特性研究可以有效辅助复杂系统架构的性能分析。一个通用复杂网络可以被表示为 $G(N, K)$,其中 N 表示节点, K 表示边。

度中心性 C^D ,用于描述静态网络节点的直接影响力^[13]。当网络中节点数为 N 时,与节点 i 直接连接的节点最多为 $N-1$ 个,对节点 i 的度中心性进行归一化后^[14]可表示为

$$C_i^D = \frac{k_i}{N-1} = \frac{\sum_{i,j \in G} a_{ij}}{N-1} \quad (0 \leq C_i^D \leq 1) \quad (1)$$

式中: k_i 为节点 i 的度; a_{ij} 为网络结构的邻接矩阵中的矩阵元素,当节点 i 与节点 j 连通时取值为 1,否则取值为 0。

中介中心性 C^B , 用于描述节点对信息流动的影响力, 当网络中节点数为 N 时, 经过节点 i 的最短路径数最大为 $(N-1)(N-2)/2$, 因此中介中心性的值^[14]为

$$C_i^B = \frac{2}{(N-1)(N-2)} \sum_{j,k,i \in G, j \neq k \neq i} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (0 \leq C_i^B \leq 1) \quad (2)$$

式中: n_{jk} 为节点 j 和 k 之间的最短路径数; $n_{jk}(i)$ 为通过节点 i 的路径数。

紧密中心性 C^C , 用于描述节点 i 到其他节点的难易程度, 节点 i 的紧密中心性被定义为节点 i 到其他节点的平均最短路径长度的倒数^[14]。

$$C_i^C = \frac{1}{\sum_{i,j \in G} d_{ij}} \quad (0 \leq C_i^C \leq 1) \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度。

网络 G 在部分节点失效后, 形成多个独立子图 $G_1, G_2, \dots, G_{s-1}, G_s (1 \leq s \leq N)$, 其中最大连通子图称为“巨片”^[13]。对于复杂网络而言, 本文以巨片作为衡量标准用于分析网络中节点失效时的鲁棒性。结合巨片的网络鲁棒性衡量指标被定义为 R ^[15], R 表示移除网络中一定比例节点后, 巨片包含节点数所占比例。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{Q=1}^N s(Q) \quad (4)$$

式中: N 为网络中节点总数; $s(Q)$ 为移除 $Q=qN (q$ 为移除节点比例) 个节点后巨片包含的节点数所占比例; $1/N$ 为对不同尺度网络的鲁棒性进行归一化比较。

当网络为完全图时 R 取最大值 0.5, 由此给出网络移除节点后的脆弱性 V , V 越大说明对于部分节点失效时网络越脆弱, 进一步说明失效节点对维持网络的鲁棒性越重要。

$$V = 0.5 - R \quad (5)$$

2 民用飞机持续安全性评估体系架构

民用飞机的持续安全性评估是一个多利益攸关方、多阶段的协作过程, ARP 5150 中概述了持续安全性评估的顶层流程, 从而保证各方评估过程的一致性, 并且运营商、原始设备制造商 (Original Equipment Manufacturer, 简称 OEM)、供应商和适航当局都可以成为整套安全性评估过程的主要执行组织。但其描述的普适性流程较为抽象, 在实

际评估的实践过程中存在一定困难。因此本文基于安全性事件, 以运营商视角为例分析持续安全性评估中所需要的动态行为和结构特征, 建立体系架构模型。

在建模前, 需要确定视图模型建立的优先级顺序, C. M. Schneider 等^[15] 根据模型功能将其分为活动、系统与辅助三个类型, 并提出 4 项原则: (1) 先活动后系统; (2) 由静态到动态再到映射; (3) 模型关系约束, 即当视图 B 依赖于视图 A 时, 则先开发视图 A; (4) 协同关系反复迭代构建。具体 DoDAF 分类如图 1 所示。

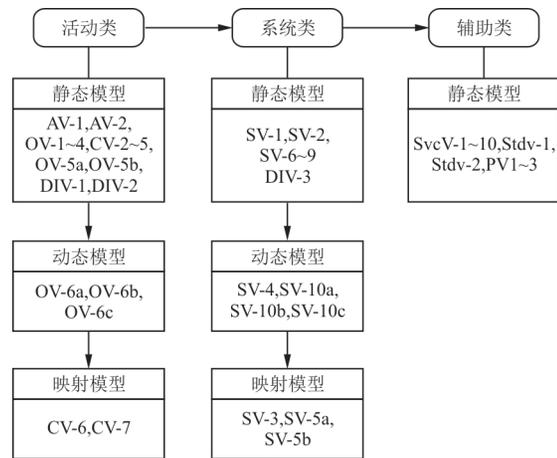


图 1 DoDAF 视图模型分类

Fig. 1 DoDAF view model classification

结合上述体系架构建模原则选用 UML 中的基本图形, 构建持续安全性评估体系架构。其构建顺序及 UML 图形与视图模型的对应关系, 如图 2 所示。

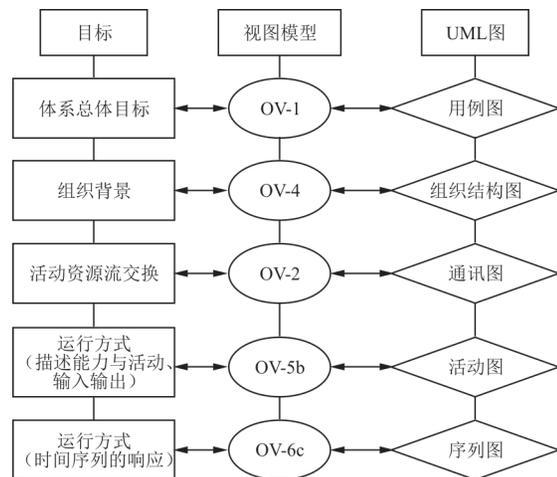


图 2 视图模型开发顺序

Fig. 2 View model development sequence

开发顺序如下:

- (1) 构建 OV-1,以明确体系边界和总体架构。
- (2) 构建 OV-4,以明确利益攸关方及其内外交互关系。
- (3) 构建 OV-2,以明确在进行操作活动中的信息交换。
- (4) 构建 OV-5b,根据操作活动间的信息交换及利益攸关方的归属关系,构建操作活动模型。
- (5) 构建 OV-6c,描述操作活动模型对时间序列的响应。

2.1 高级操作概念图

高级操作概念图 OV-1 通过文字或图像描述系统的目的和顶层架构。持续安全性评估是涉及多利益攸关方的可迭代的闭环过程,以运营商视角为例,其顶层活动包括:

- (1) 运营商根据安全目标及机队要求设置安全性期望,建立相应监控参数。
- (2) 运营商实施持续的参数监控,捕获存在的不安全事件。
- (3) 运营商协调制造商、供应商和适航当局,采用安全性评估方法对不安全事件进行评估。
- (4) 相应责任方为亟待解决的安全性问题制定行动计划。
- (5) 运营商获取各方行动计划进行资源配置和计划实施。

在 UML 模型中以用例图的形式展现 OV-1,明确持续安全性评估的范围和利益攸关方,建模结果如图 3 所示。

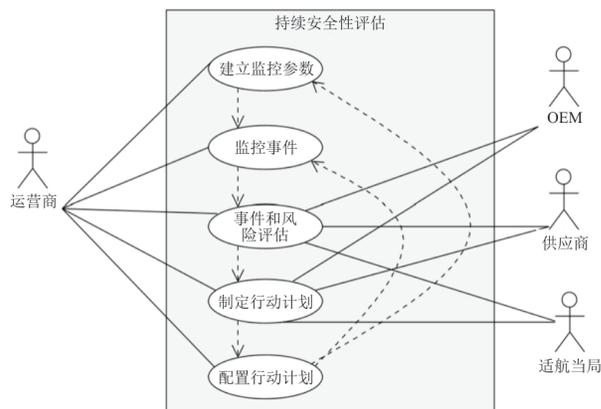


图 3 高级操作概念图 OV-1

Fig. 3 High-level operational concept graphic OV-1

2.2 组织结构图

组织结构图 OV-4 用于描述操作节点、组织和人员之间的关系,如图 4 所示。从运营商视角出发,参考我国民航安全管理方案中《关于航空运营人安全管理体系的要求》^[16],为实现 OV-1 中的操作目标,运营商需具备安全管理、数据监控、风险评估、行动计划制定和实施 5 个部门,并设立外部信息处理部门对制造商、供应商和局方的评估结果及行动计划反馈进行整合和分析。此外各利益攸关方之间也存在紧密的交互操作。

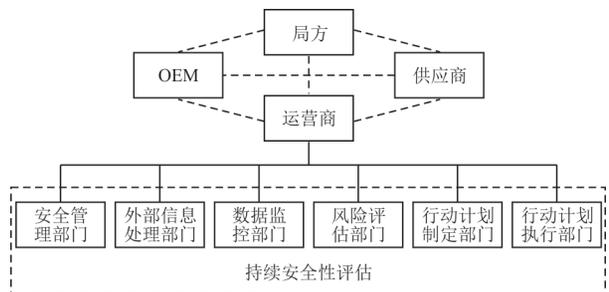


图 4 组织结构图 OV-4

Fig. 4 Organizational relationships chart of OV-4

2.3 操作资源流描述

操作资源流描述 OV-2 阐述用户间资源流的逻辑关系,如图 5 所示。OV-2 通过资源流图构建,明确了持续安全性评估过程中数据流和利益攸关方的逻辑模式。

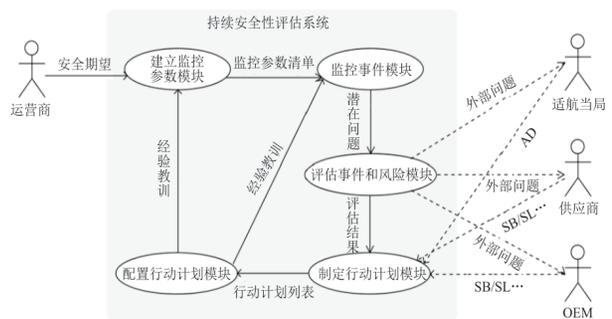


图 5 操作资源流描述

Fig. 5 Operational resource flow description

从系统跨度角度分析,将持续安全性评估中的资源流分为两类。

- (1) 运营商系统内部资源流:用于关联运营商内各部门职能,组织系统内各子模块逻辑,实现 OV-1 中顶层操作过程的资源流,包括安全期望、

监控参数清单、捕获的潜在问题、安全性评估结果、行动计划列表以及实现系统迭代功能的经验教训反馈。

(2) 各方系统交互资源流:在风险评估和行动计划制定过程中用于获取和反馈外部信息的资源流,包括评估确定的外部问题和以适航指令(Airworthiness Directive,简称AD)、服务通告(Service Bulletin,简称SB)、服务信函(Service Letter,简称SL)等形式反馈的行动计划。

2.4 操作活动模型

操作活动模型OV-5b用于描述操作中的决策过程和逻辑关系。以活动图的形式展现OV-5b,如图6所示。基于持续安全性评估体系资源结构

和能力需求创建,对运营商的安全评估过程进行扩展描述,形成具体工作流,OEM、供应商的事件评估过程和局方适航指令制定过程仅进行顶层流程规范描述。

运营商监控到不安全事件并对其进行评估,能够进行内部解决的问题则由运营商制定行动计划并进行计划选择和审批,需要外部解决的问题则将事件信息传递给OEM,OEM内部对事件进行评估后将事件信息通知给相应供应商,由OEM和供应商制定SB等行动计划,并由SB发送到适航当局,由局方判断是否需要制定AD,最终由运营商执行内外部行动计划,对计划的实施过程进行追踪,并将相关文件和经验教训进行归档,更新需要监控的参数和事件。

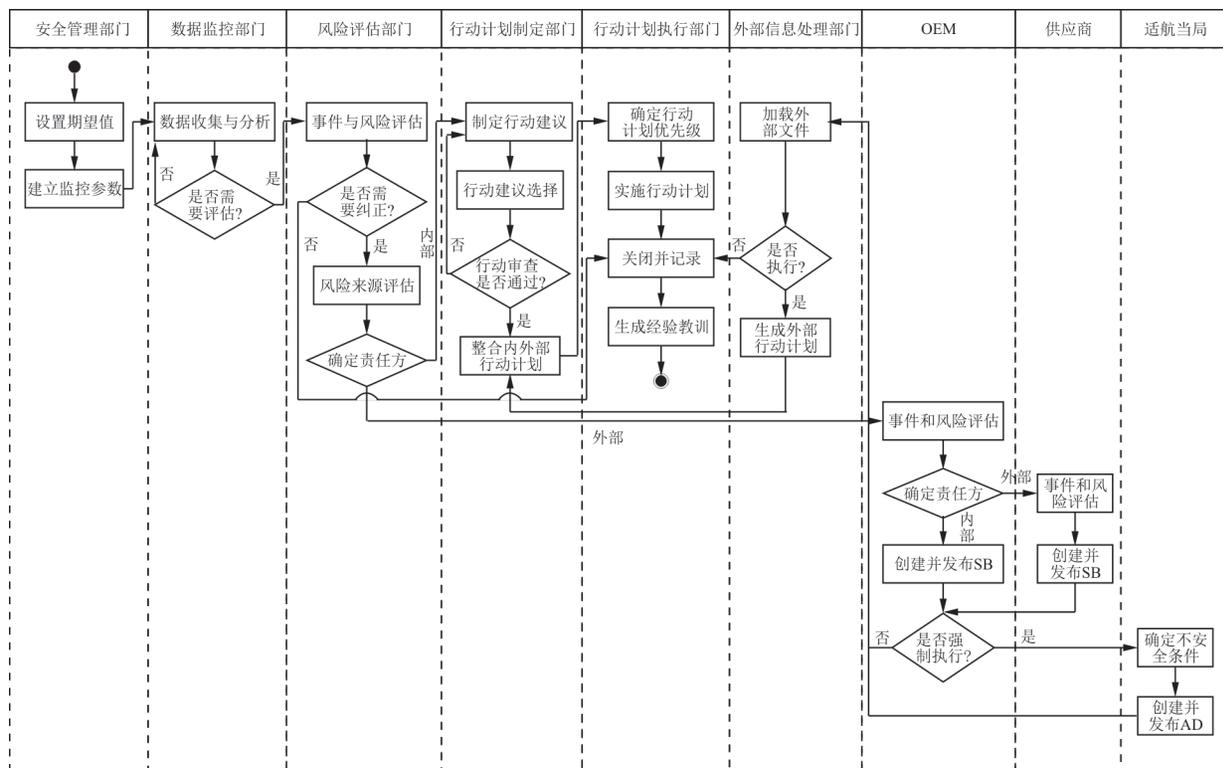


图6 操作活动模型
Fig. 6 Operational activity model

2.5 事件跟踪描述

基于OV-5b构建事件跟踪描述OV-6c,用于展现关键的操作时序以体现体系的动态特征,以顺序图的形式展现OV-6c。为使顺序图中操作覆

盖率更高,假设所有利益攸关方均需要参与事件行动计划制定操作,因此节点包括运营商及其内设部门、OEM、供应商和局方,具体过程如图7所示。

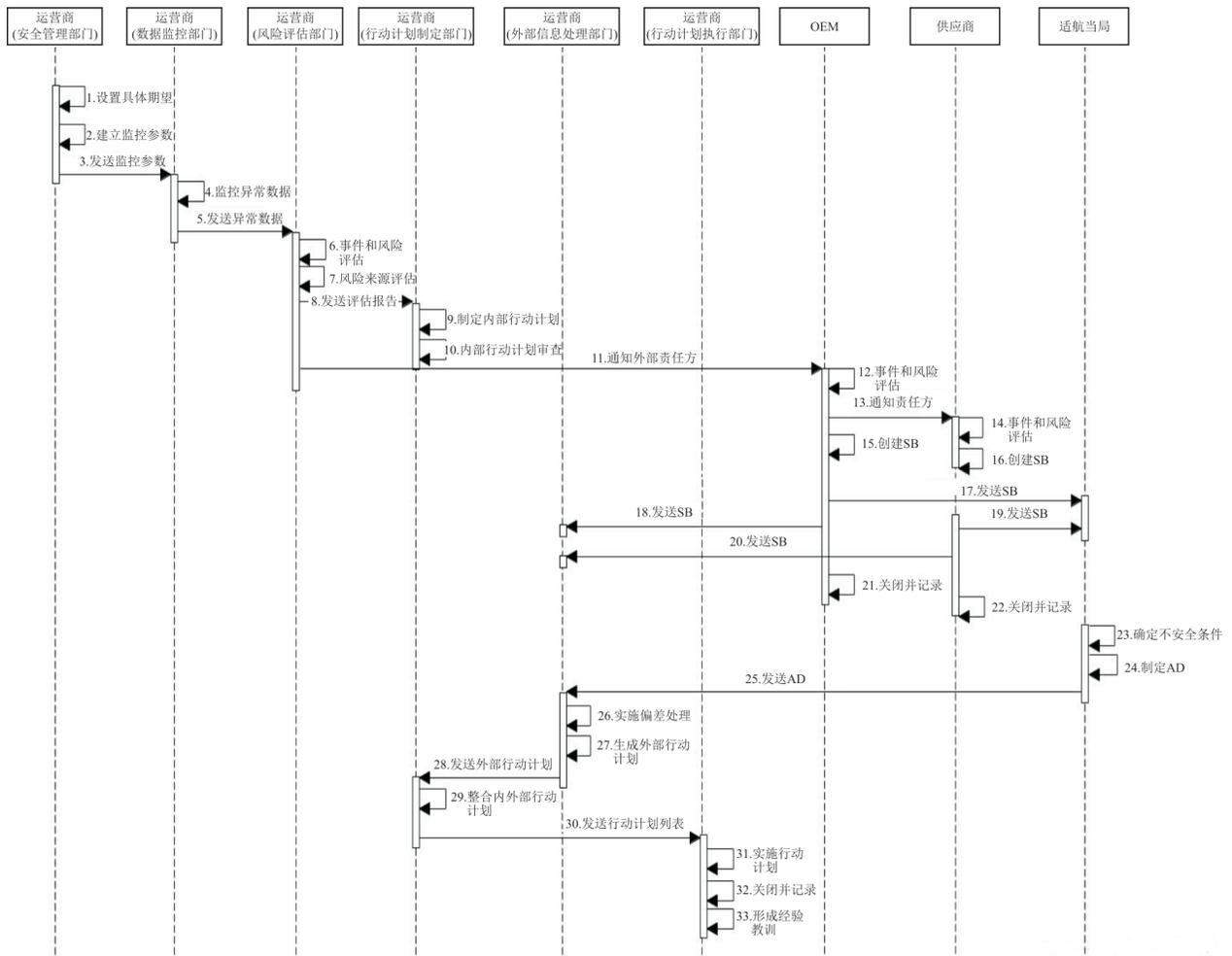


图7 事件跟踪描述

Fig. 7 Event-trace description

3 持续安全性评估体系架构分析

通过UML建立的DoDAF视图模型OV-5b和OV-6c将持续安全性评估分解为一系列操作活动,明确了体系中所包含的活动者、活动及活动组织流程,形成了操作与决策相互依赖的复杂网络。其中存在大量由活动者参与的决策活动,而活动图与序列图灵活性较低,对动态决策的表述能力有限,且很难对其进行分析和评估。因此,本文引入叙事网络对OV-5b和OV-6c中的活动序列进行表述,从而增强建立的体系架构的灵活性,通过复杂网络的中心性、鲁棒性分析,实现对持续安全性体系架构的评估。

3.1 体系架构网络构建

叙事网络^[17]是以网络形式组织的形式描述一组连贯且统一的行动复杂网络,其基本理论借鉴

了结构化理论^[18]、演员网络理论^[19]和组织常规理论^[20],明确可能或已经发生的各种行为活动。叙事网络不是单一的叙述,而是由来自不同角度和不同利益攸关者的“叙事片段”组成,其目的是显示出每个局部和不完整的观点是如何对整体的生活实践作出贡献的。

叙事网络可由 $G(N, K)$ 表示, N 为节点,在叙事网络中节点被称为“叙事片段”; K 为边,在叙事网络中则代表叙事片段间的顺序关系,因此叙事网络可以形式化表示为一个有向图。叙事网络的构建过程有很大的自由度,其基本步骤为:(1)确定叙事边界的要素:场景、行为、行为者、机构和目的;(2)从不同角度收集叙事片段;(3)将叙事片段进行排序连接。以OV-5b中“设置期望值”“建立监控参数”两个操作为例描述活动序列到叙事网络的转化过程,重点标识网络起止叙事片段,如图8所示。

通过上述过程对 OV-5b 中所包含的所有操作 活动进行网络构建,生成的叙事网络如图 9 所示。

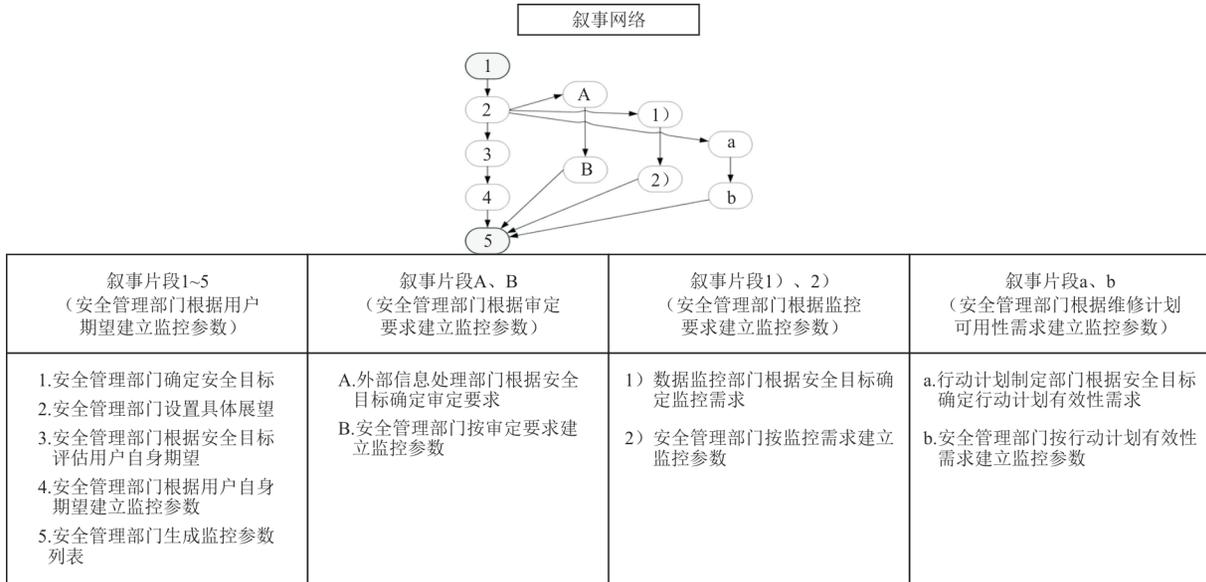


图 8 叙事网络建立过程

Fig. 8 Narrative network building process

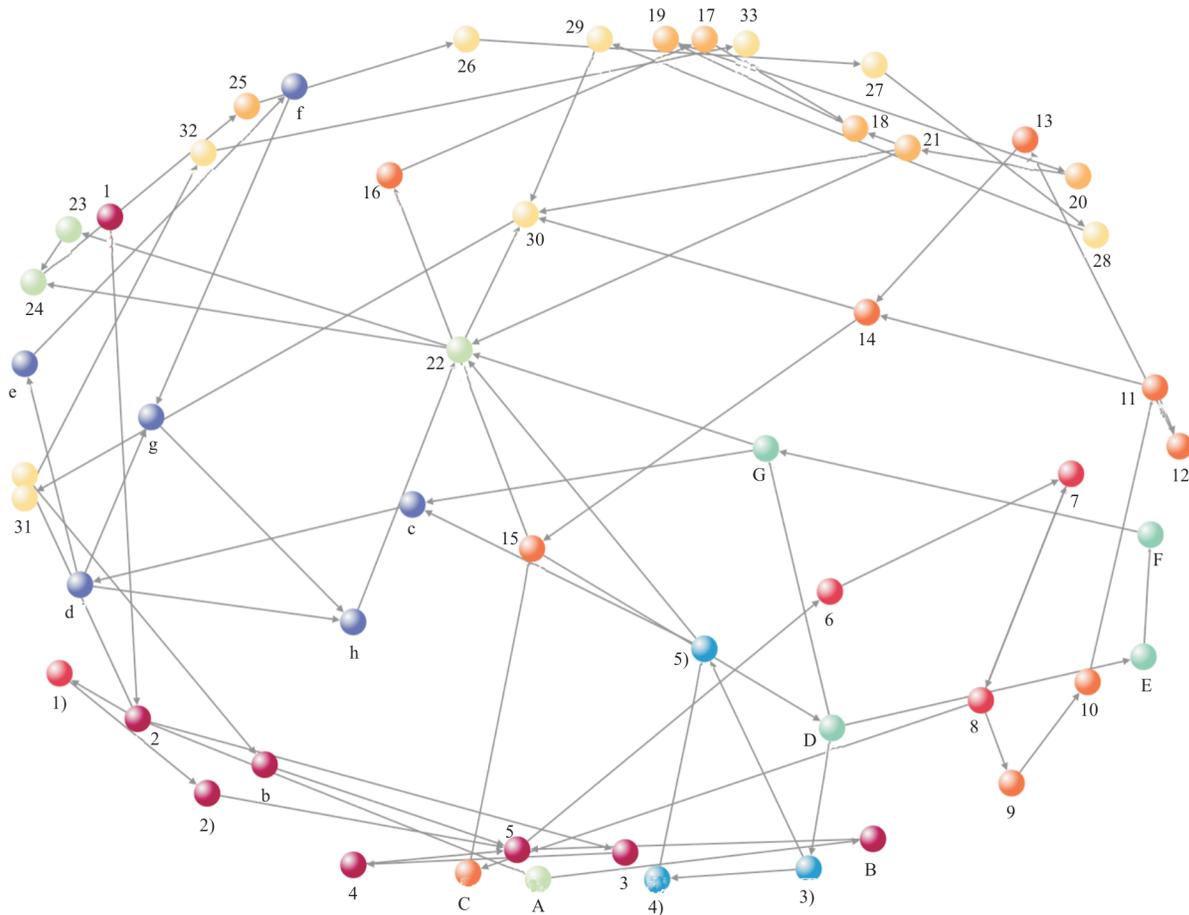


图 9 “民用飞机持续安全性评估”叙事网络

Fig. 9 "Ongoing safety assessment of civil aircraft" narrative network

网络拓扑性质如表 1 所示,其中 N 为节点数, M 为边数, $\langle k \rangle$ 为平均度, L 为平均路径长度, G_N 为巨片中所含节点数。

表 1 拓扑特性
Table 1 Topological characteristics

指标	数值	指标	数值
N	53	L	6.689
M	71	G_N	53
$\langle k \rangle$	1.34		

3.2 关键节点及鲁棒性分析

巨片可以描述网络中部分节点功能失效后网络的连通程度,以此来反映网络的鲁棒性。由中心性的定义可知,网络中节点的中心性越高,与其他节点的交流和互动也越复杂,在持续安全性分析体系架构网络中,其所代表的活动程序复杂程度就越高,因此更容易发生失效。本文对持续安全性系统架构网络中的节点进行中心性分析,并按照中心性递减的顺序依次移除网络中的节点,模拟持续安全性分析过程中行为失效累积的情况,从而识别重要活动,并通过网络的鲁棒性分析,对所构建持续安全性评估体系架构的稳定性进行评估。

对于同一节点来说,其度中心性、中介中心性、紧密中心性指标不同,并且以不同中心性为标准移除网络节点时对网络鲁棒性的影响不同,因此,分别以三种中心性为移除网络节点的标准,按照中心性递减的顺序移除部分节点,对其巨片节点个数的变化趋势进行对比并分别计算其脆弱性指标,如图 10 所示。

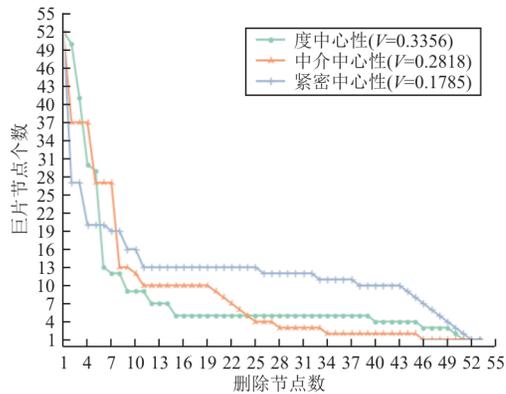


图 10 巨片大小变化趋势

Fig. 10 Trends in largest component size

从图 10 可以看出:以三种中心性为标准移除网络节点时,巨片节点个数的变化趋势相似;以度中心性为标准移除网络节点时,网络的脆弱性指标最高;以紧密中心性为标准移除网络节点时,网络的脆弱性指标最低;当移除前 10 个节点时,巨片节点个数下降较快,随后再移除节点,巨片节点个数不再发生明显变化。

根据对比分析可知,为衡量网络节点对网络鲁棒性的影响程度,应综合考虑网络节点的中心性指标以及移除网络节点时网络的脆弱性指标。以不同中心性为标准移除网络节点时,网络的脆弱性指标越高,说明此中心性指标对网络鲁棒性的影响越大。因此,建立节点对网络鲁棒性影响的重要程度的评价指标为

$$I_{node} = V_e \cdot S_{node} \quad (6)$$

式中: V_e 为基于不同中心性顺序模拟节点失效时网络的脆弱性指标 V 所组成的向量; S_{node} 为节点的不同中心性指标组成的向量; I_{node} 为节点的重要程度,当网络节点中心性越大,且以此中心性指标移除网络节点时网络的脆弱性指标越大,则节点的重要程度越高。

移除前 10 个节点时巨片节点个数变化较快,说明前 10 个节点对网络鲁棒性影响较大,网络节点重要度评分前 10 位的节点重要程度评分情况如表 2 所示。

表 2 节点重要度指标
Table 2 Node importance metrics

节点标记	操作	重要度指标
22	加载外部文件	0.115
15	风险来源评估	0.086
8	分析异常信息	0.080
5	生成监控参数	0.077
D	OEM 事件和风险评估	0.073
30	关闭并记录	0.067
G	OEM 关闭并记录	0.065
7	采集异常信息	0.051
14	事件和风险评估	0.048
6	提取监控参数	0.048

从表 2 可以看出:节点标记“22”为重要性最高的节点,其代表由运营商外部信息处理部门进行的“加载外部文件”操作,说明运营商对制造商所

发布的SB与局方所发布AD的接收、分析与执行在持续安全性评估过程中起重要作用,与其他操作的交互最为复杂,最容易出现失效状况,但同时也对维护系统架构的稳定性起到重要作用;重要度排名前10位的节点中,节点标记“6”“7”“8”均由运营商数据监控部门进行操作,节点标记“14”“15”均由运营商风险评估部门进行操作。运营商数据监控部门和运营商风险评估部门为包含重要网络节点最多的组织,说明与其他部门间的交互最为复杂,在持续安全性评估过程中起到重要作用。

根据上述分析对已建立的民用飞机持续安全性评估体系视图模型进行优化,优化措施包括两个方面。

(1) 针对分析所得重要度较高的操作节点的执行部门,提升其在组织结构中的层次和管理权限,包括数据监控部门和风险评估部门,提高与其他部门间交互操作的有效性,优化后的组织结构图OV-4如图11所示。

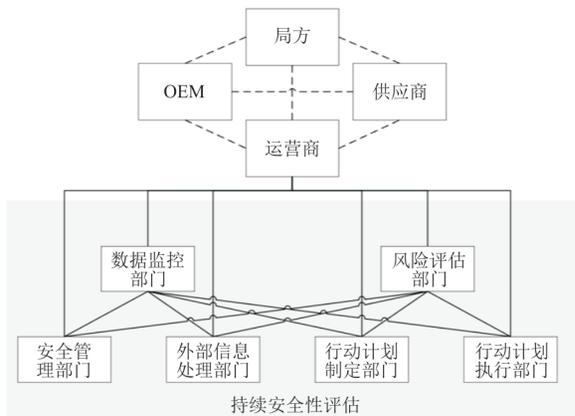


图 11 组织结构图 OV-4
Fig. 11 Organizational relationships chart

(2) 针对重要度及中心性较高、对体系总体鲁棒性影响较高的操作节点,通过对操作节点进行职能分化,将单一操作分解为多个并列操作,以降低单一操作失效时对体系稳定性的影响。以“加载外部文件”操作为例,分化后的操作活动模型OV-5b如图12所示。

针对优化后的网络进行基于巨片节点个数的鲁棒性分析,优化前后根据重要度降序移除操作节点后巨片节点个数的变化趋势如13所示,将标号“22”的“加载外部文件”操作节点分解为标号“22a”“22b”“22c”的三个并列节点,可以看出:优化

后移除三个并列节点时巨片节点个数变化更小,网络鲁棒性更高,体系架构稳定性更强。

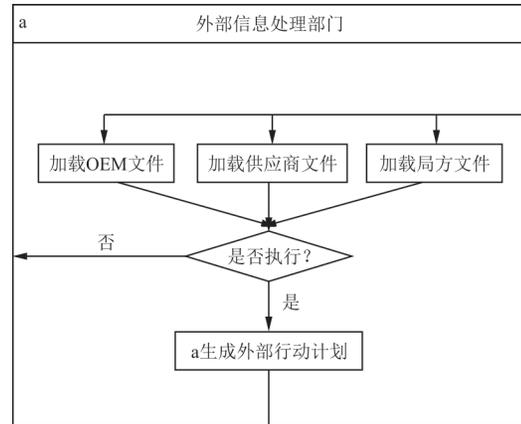


图 12 “加载外部文件”操作活动模型 OV-5b
Fig. 12 "Loading external files" operational activity model OV-5b

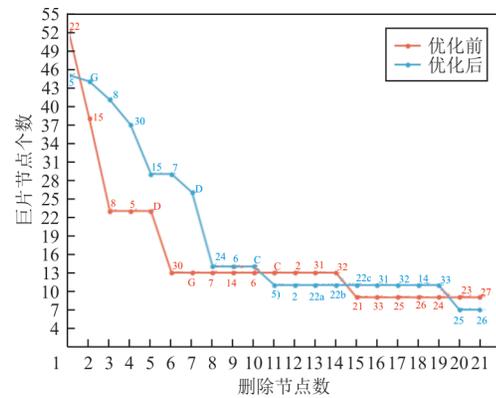


图 13 优化前后巨片大小变化趋势
Fig. 13 Trends in largest component size before and after optimization

4 结 论

(1) 本文基于 ARP 5150 标准构建了民用飞机持续安全性评估体系架构,整合了民用飞机持续安全性评估顶层目标、组织结构及业务逻辑,为运营阶段的安全性评估提供指导。

(2) 根据重要度评价指标识别出运营商加载外部信息为重要度最高的操作节点,数据监控和风险评估部门包含的关键节点数最多,相关操作对民用飞机持续安全性评估流程的影响较大,优化后体系结构稳定性增强。

我国持续安全评估体系建设处于起步阶段,目前评估过程中涉及的运营商、供应商、OEM 和局方等各个层面所采用的评估方法不尽相同,给评估过程中各方协调和交互带来一定困难。为建

立完善的持续安全性评估体系,需要进一步研究系统化的持续安全性评估方法,从而加强评估方法的一致性。

参考文献

- [1] SAE. Safety assessment of transport airplanes in commercial service: ARP 5150[S]. Washington DC: Society of Automotive Engineer, 2003.
- [2] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. S5000F 介绍及在民用飞机运行可靠性分析反馈中的应用[J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 147-158.
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Introduction of S5000F specification and its application on operational reliability analysis and feedback of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 147-158. (in Chinese)
- [3] US Department of Defense. The DoDAF architecture framework version 2.02[R]. US: US Department of Defense, 2010.
- [4] TAO Z G, LUO Y F, CHEN C X, et al. Enterprise application architecture development based on DoDAF and TOGAF[J]. Enterprise Information Systems, 2017, 11(5): 627-651.
- [5] 王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2265-2274.
WANG Xinyao, CAO Yunfeng, SUN Houjun, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(10): 2265-2274. (in Chinese)
- [6] LIU H, TIAN Y, GAO Y, et al. System of systems oriented flight vehicle conceptual design: perspectives and progresses[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3): 617-635.
- [7] CHEN Zhiwei, ZHAO Tingdi, JIAN Jiao, et al. System of systems architecture modeling and mission reliability analysis based on DoDAF and petri net[C]// 2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.]: IEEE, 2019: 1-6.
- [8] 何锋. 一种基于 UML 活动图的工作流模式描述与验证方式[J]. 科技信息, 2009(33): 789-791.
HE Feng. A sort of method about description and verification of workflow base on that activity diagram of UML[J]. Science & Techonlogy Information, 2009(33): 789-791. (in Chinese)
- [9] POTTS L. Diagramming with actor network theory: a method for modeling holistic experience[C]// 2008 IEEE International Professional Communication Conference. Montreal: IEEE, 2008: 1-6.
- [10] HAYES G R, LEE C P, DOURISH P. Organizational routines, innovation, and flexibility: the application of narrative networks to dynamic workflow[J]. International Journal of Medical Informatics, 2011, 80(8): 161-177.
- [11] CHAO C A. The impact of electronic health records on collaborative work routines: a narrative network analysis[J]. International Journal of Medical Informatics, 2016, 94: 100-111.
- [12] 李浩然, 王子恒, 杨起帆, 等. 复杂网络下地铁灾害链演化模型与风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 141-147.
LI Haoran, WANG Ziheng, YANG Qifan, et al. Evolutionary model and risk analysis of metro disaster chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 141-147. (in Chinese)
- [13] 陆靖桥, 傅秀芬, 蒙在桥. 复杂网络的鲁棒性与中心性指标的研究[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(4): 302-305.
LU Jingqiao, FU Xiufen, MENG Zaiqiao. Research on robustness and cebtrality metricis of complex networks[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(4): 302-305. (in Chinese)
- [14] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social Networks, 1978, 1(3): 215-239.
- [15] SCHNEIDER C M, MOREIRA A A, ANDRADE J S, et al. Mitigation of malicious attacks on networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(10): 3838-3841.
- [16] 中国民用航空局. 关于航空运营人安全管理体系的要求: AC-121/135[S]. 北京: 中国民用航空局, 2008.
Civil Aviation Administration of China. Requirements on the safety management system for airline operators: AC-121/135[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2008. (in Chinese)
- [17] PENTLAND B T, FELDMAN M S. Narrative networks: patterns of technology and organization[J]. Organization Science, 2007, 18(5): 781-795.
- [18] SHILS E. The constitution of society[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1982.
- [19] LATOUR B. Reassembling the social: an introduction to actor-network-theory[M]. UK: Oxford University Press, 2005.
- [20] FELDMAN M S. Organizational routines as a source of continuous change[J]. Organization Science, 2000, 11(6): 611-629.

作者简介:

贾宝惠(1971—),女,硕士,教授。主要研究方向:维修工程分析与持续适航技术。

杨丽晨(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:民用飞机故障诊断与健康管理,持续安全性评估。

王玉鑫(1983—),女,硕士,讲师。主要研究方向:民用飞机系统安全性评估。

(编辑:丛艳娟)