

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-07

民用飞机飞行非正常操作程序条目建立方法

张丛远¹, 杨延延²

(1. 上海飞机客户服务有限公司 技术出版物部, 上海 200241)

(2. 上海飞机客户服务有限公司 飞行专业管理办公室, 上海 200241)

摘要: 非正常程序是飞行员处置各类应急情况的重要依据, 由于缺少相应的程序条目建立方法, 使程序条目易产生冗余或缺漏。将非正常程序分为四类: 适航规章类、功能失效类、航线运行因素类和机型特点类, 提出对应的程序条目建立方法; 运用规章查询、系统安全性分析——“失效模式和影响分析”(FMEA)和“功能危险性分析”(FHA)、借鉴相似机型等方法, 根据“操作需求”建立非正常操作程序条目, 获得更准确的结果, 再将设计结果迭代优化CAS信息的设计。应用上述方法开发某国产民机燃油系统非正常操作程序验证此方法能有效建立功能条目, 使程序设计结果更符合飞行员的预期。

关键词: 系统安全性分析; 非正常操作程序; 故障分析; 飞行程序; FMEA; FHA

中图分类号: V323.11

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Establishment method of civil aircraft abnormal operation procedure items

ZHANG Congyuan¹, YANG Yanyan²

(1. Technical Publication Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. Flight Major Management Office, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: Abnormal procedures are the important basis for the flight crew to handle emergency conditions. There is no current establishment method of procedures items, which makes unnecessary or omission may easily occur in the procedure items. The abnormal procedures are divided into four types: airworthiness regulation, function failure, route operation factor and model feature procedures, and corresponding procedure items establishment methods are proposed. Abnormal operation procedures are established based on "operation require", through regulation inquiry, system security analysis (failure mode and effect analysis (FMEA) and functional hazard analysis (FHA)), reference to similar type and etc. Those all makes the results more accurate. And then this result is iterated to optimize the CAS design. This method is verified to be able to establish procedure items by using it to develop some domestic civil aircraft fuel system abnormal operation procedures, and it makes the design result more in line with expectations of pilots.

Key words: system security analysis; abnormal operation procedure; fault analysis; flight procedure; FMEA; FHA

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2024-03-04

通信作者: 张丛远(1989-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: 895200270@qq.com

引用格式: 张丛远, 杨延延. 民用飞机飞行非正常操作程序条目建立方法[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-7.

ZHANG Congyuan, YANG Yanyan. Establishment method of civil aircraft abnormal operation procedure items[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-7. (in Chinese)

0 引言

飞机飞行过程中,一旦系统发生故障,执行非正常操作程序是飞行员处置各类应急情况的首要手段^[1]。合理设置程序条目和操作步骤^[2],对于提升航空安全有着重要意义。

现有的非正常程序研究成果仅涉及书写要求^[3]和总体工作流程^[4-5],缺少详细推导方法。非正常程序主要用于飞行员处理各类系统故障,而探索故障的系统安全性分析(失效分析)方法在国内外民航制造领域已经广泛使用,目前主要用于系统设计阶段的安全性评价^[6-7]以及维修中的故障原因排查^[8-9]。但系统安全性分析如何应用于非正常操作程序设计尚未有成熟的理论指导和相关文献^[10-12]。

在实际操作中由于缺少分析方法,除了少数适航规章强制要求的程序外,设计人员只能根据CAS信息和“借鉴相似机型”建立程序条目,存在以下问题:人工订立CAS颗粒度和等级的过程受限于设计人员的知识和处置理念,设计结果受到主观因素影响会使部分CAS设计不符合飞行员操作需求;适航规章规定的必备CAS需要适用于所有的飞机,但当具体某个机型的系统设计较完善或有备份的安全机制时,规章中的相应内容对于安全等级很高的系统就形成了无需操作的冗余告警;“借鉴相似机型”,对于借鉴内容没有详细的原则。

上述因素产生两项弊端:建立了许多只有“机组注意”无操作步骤的冗余程序;无CAS而有操作需求的条目容易产生缺漏。为获得准确的程序条目,针对其分析方法的研究很有必要。

本文通过比对成熟机型的程序条目对程序进行分类,针对不同类型的程序给出建立方法和原则。以某国产民航燃油系统进行实例分析,对该方法的可行性和准确性进行验证。

1 程序分类和建立方法概述

1.1 适航规章类

民航局发布的适航规章^[1]中明确要求所有型

号飞机必须包含的操作程序为适航规章类程序,按民航局要求直接建立程序条目。

1.2 功能失效类

参照“飞机功能定义”,针对某功能故障情况下的处置程序,判断为功能失效类程序。

用系统安全性分析法建立此类程序条目。针对单一故障采用FMEA,根据系统运行逻辑推演故障蔓延路线,选取路线上的可感知节点分析“操作需求”,根据“操作需求”而非CAS等级建立程序条目截断故障蔓延;针对组合故障,采用FHA,根据故障树分析(FTA)建立组合故障程序条目;根据飞行员对“故障现象”的感知渠道合并程序条目从而形成功能失效类程序条目清单。功能失效类程序条目设计流程如图1所示

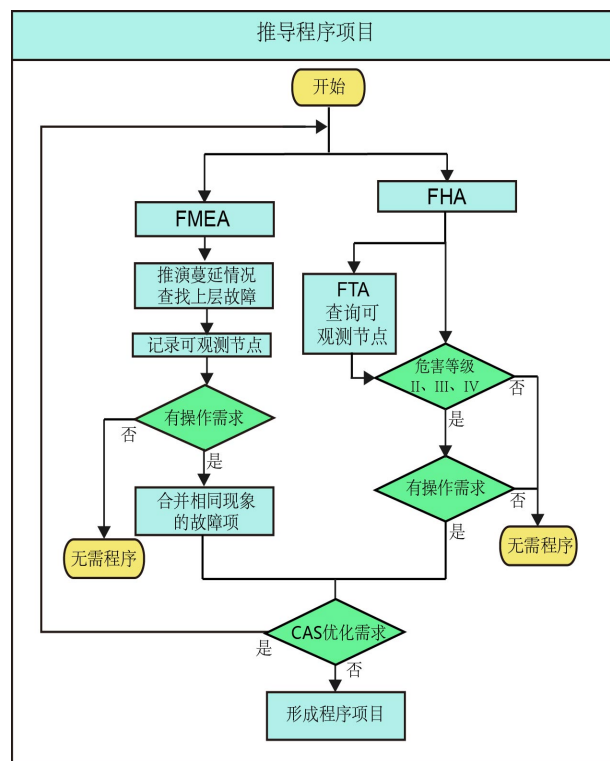


图1 功能失效类程序条目设计流程

Fig. 1 Function failure procedure item design process

1.3 航线运行因素类

对A、B、C(均为代号)三个机型进行系统安全性分析,将分析结果与其在运行中的程序条目清单进行对比,如表1所示。

表1 程序对比结果
Table 1 Comparison results of procedures

序号	程序	来源	系统安全性分析未包含的原因
1	所有油箱低油面	A	燃油消耗过度是由运行操作导致,不属于功能故障
2	油箱温度低	A B C	由运行环境导致,不属于功能故障
3	中央翼油箱两个燃油泵失效或低压	A	1. 组合故障不在FMEA中;2. 不会影响子系统级功能的故障不在FTA中

对比后发现系统安全性分析结果未能包含的3项程序都来源于温度、距离、油耗等航线运行因素。得到结论:建立非正常飞行操作程序必须进行航线运行因素分析。

航线运行因素是发散的,与系统安全性相比拥有不确定性,系统化分析难度大。通过借鉴成熟机型的程序条目来获得运行场景和经验非常高效,由此确定了“借鉴相似机型”的原则。

1.4 机型特点类程序

对比同类机型A、B、C(均为代号)中所有燃油系统非正常程序条目。仅A适用的程序有14条,主要关于后两者不具备的功能。排除功能失效类程序后分析剩余条目,发现系统正常无功能丧失的情况下,存在因设计特点产生操作需求的程序,本文称为机型特点类程序。此类程序主要来源于两种情况:

1) 有益的系统告警(例:失速预警和重心监控),提升安全保障。通过查询飞机设计前期的

“系统功能定义”来建立程序条目。

2) 有害的系统间影响:某系统功能正常时,因运行逻辑、输入或负载与另一系统相关联,受另一系统影响而产生操作需求。此类程序通过其它系统故障时的安全性分析获得(过程同1.2节内容,不再重复描述)。

2 建立程序条目的方法

2.1 FMEA建立功能失效类程序条目

作为故障“演绎式”失效分析,故障树中只包含“系统功能失效”。但并不是所有故障都属于系统功能丧失,例如油箱低油面、油滤即将堵塞等,尚未形成功能丧失,但会降低飞行容错率,后果非常严重。因此失效模式和影响分析(FMEA)阶段要脱离功能危险性分析(FTA)做同类的故障蔓延推演。

对“故障影响”进行归类和影响分析^[13-14],依照系统设计逻辑进行推演,零部件的故障影响向上蔓延,找到蔓延路线上的可观测故障节点。例:油管破裂不可观测,但故障蔓延后导致油量快速下降可通过简图页的油量显示观测到,将其列入“故障影响”开展进一步的操作分析,列出“操作或注意事项”;继续推演故障影响的蔓延,导致燃油不平衡和低油面现象可以通过CAS信息观测到,将CAS信息填入“现象”栏待合并为程序。

合并拥有相同现象的故障,以现象作为程序名可使飞行员在感知到以后便于检索,部分样例FMEA分析情况如表2所示。

表2 FMEA分析(部分样例)
Table 2 FMEA analysis (partial sample)

部件	故障	故障影响	操作或注意事项	合并程序条目 (现象)
发动机供油切断阀	失效在关闭位置	丧失该发动机供油能力	无法起动发动机	L(R) ENG FUEL SOV FAULT
发动机供油切断阀驱动器	不能输出扭矩	丧失该发动机供油能力	无法起动发动机	

另外,本文将CAS信息也只作为可观测到的现象而成为程序名,不以是否存在CAS或CAS等级作为是否建立程序的依据。这样可以回避CAS颗粒度或等级设计不合理的问题。分析结果将来可反向优化CAS。

2.2 FHA+FTA建立功能失效类程序条目

许多功能丧失是由于复数部件同时失效,即:组合故障。从FMEA(单因素分析方法^[13])入手无法分析,因为不可能对所有部件失效做排列组合,所以直接从FHA^[15-16]里罗列的各大功能入手,结合FTA故障树^[17-18]推导出导致该功能丧失的次级

直接故障和组合故障。

参照“飞机功能定义”制定FHA项目作为顶层故障,顶层的灾难性故障通常无有效操作、无需建立程序,但需要进行FTA^[19]推导,因为在发展成顶层灾难性故障前,可能存在某个节点能够通过设置程序条目斩断故障蔓延。

查询FTA进行功能失效溯源^[15]。FTA故障树中,“AND”表示“与”逻辑,所有子层级故障同时

发生才能触发;“OR”表示“或”逻辑,任一子层级故障发生就能触发^[20]。

在FTA故障树中标注所有可观测的现象,然后针对“AND”记录下各分支中的现象并组合成一个程序条目。针对“OR”若多个分支存在可观测现象,则每个分支组合一次,形成多个程序条目。部分样例的FTA分析过程如图2所示。

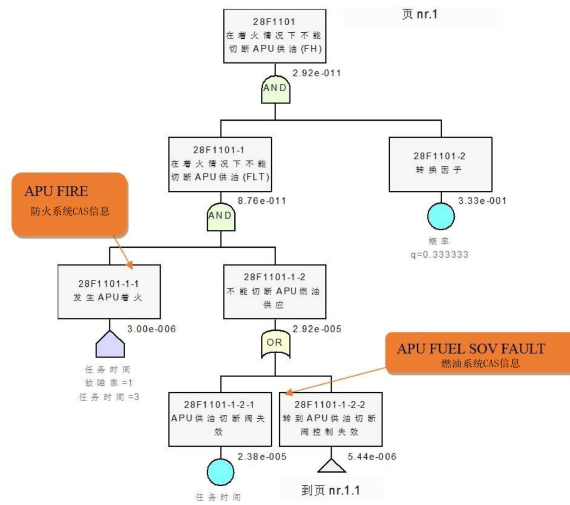


图2 FTA分析(部分样例)

Fig. 2 FTA analysis (partial sample)

对记录下的各程序条目做操作分析,若故障无有效应对操作,无需形成正式的程序条目。

当多个单一故障发生组合后的处置操作,与各故障单独发生时的操作叠加结果明显不同时,则确定有新增“操作需求”。反之则判定无新增“操作需求”,只要分别执行子故障的程序即可。

有新增“操作需求”的组合故障如何建立程序条目有两种方案:1)若组合前后操作差异大,则新建一个A+B程序条目;2)若组合前后操作差异小,则在程序A或B中的一个或每个程序中,以“若XXX,则XXX”的形式增加另一故障发生时的补充操作。

2.3 查询“系统功能定义”建立机型特点类程序条目

查询飞机设计前期的“系统功能定义”文件,寻找非系统故障情况下的CAS告警通知,并判断此告警是否有“操作需求”,即:若不针对此告警执行任何操作会有怎样的后果,对飞机运行的影响,这些影响是否可以接受。即使没有需立刻执行的

操作,也要分析是否有飞行员应当知晓的影响后续飞行的内容,都应作为“操作需求”通过建立程序告知飞行员。建立程序的原则主要包含以下6条:1)已经直接或间接导致功能失效;2)如果机组未采取相应操作,未来会导致功能失效;3)可能会对飞机设备或结构使用寿命有显著影响;4)可能会产生非预期的显著的气动构型变化;5)影响机上人员正常呼吸;6)使原定飞行参数产生变化,如油耗、通信方式、着陆长度等参数,伴随次生的潜在危险的因素。若有则以该告警作为程序名建立程序条目。

2.4 对比相似机型建立航线运行因素类程序条目

将目前得到的程序条目清单,同相似机型做对比,筛选出差异项,并剔除因功能设计导致差异的程序条目(相似机型的个别功能在本机型上并不具备,那就不存在发生此功能故障的可能性,此类故障处置程序就肯定不需要),剩余内容都属于航线运行因素。查看其处置对象是否适用于本机

型,即判断该问题是否具有发生在本机型上的可能性。此判断涉及3方面:1)本机型是否可能遇到同样的运行场景,如低温环境导致结冰等;2)本机型是否具有相似的功能或运行原理;3)本机型是否具有其它的备份系统可保证比相似机型更高的安全性。若同类场景与同类运行原理都同时具备,且无更高等级的安全保障,则表示此功能或系统在本机型上也存在发生同类故障的可能。

然后依据本文2.3节中“操作需求”的分析原则,判断是否建立程序条目。

2.5 程序分析结果迭代优化 CAS 信息

完成上述程序建立工作之后,针对剩余未建立程序条目的CAS信息可以考虑删除或降级,但即使CAS没有对应的处置操作仍需分析它对于飞行员掌握飞机状态的参考价值,具体判断原则如下:

删除CAS信息应遵循以下原则:1)飞行员知晓与否不影响本次飞行安全;2)存在自动逻辑对故障进行处置,且自动逻辑可靠度足够高;3)对未来会导致功能失效,而该未来状态又已设置程序,即有门槛值更高的CAS信息;4)对于航程、温度等航线运行因素间接导致失效状态事件,若失效状态本身设置了需要机组立即知晓的告警,则运行因素本身可以不设置CAS信息。

降级CAS信息可参考以下各CAS等级的定义如表3所示。

表3 CAS信息等级定义
Table 3 CAS message level definition

等级	定义
警告 WARNING	要求机组立即知晓并立即采取纠正或补偿行动。
警戒 CAUTION	要求机组立即知晓,但执行操作的紧迫程度低。
咨询 ADVISORY	要求机组知晓,包含需要执行的操作,或影响后续操作的信息。
状态 STATUS	系统状态改变,为增强情景意识而设置的反馈消息。

针对有操作需求但无CAS提示的故障现象,可考虑增加探测机制和对应CAS,主要参考以下原则:1)直接或间接导致功能失效,且确定存在操作需求;2)满足原则1)的前提下,飞行员对异常状

态的识别存在困难,需要飞机系统辅助,或异常现象不够显著易被忽略,则需新增相应CAS信息;3)满足原则1)的前提下,飞行员可以通过持续监控参数识别异常状态,但增加飞行员负担,则需新增相应CAS信息;4)已有单一故障CAS信息,且已建立组合故障的程序条目,为了便于识别可新增一条直观反映组合故障的CAS信息,在多个故障共同发生时触发此告警。

3 应用实例

应用本文的分析方法,建立某型号国产民机燃油系统的非正常操作程序条目清单。

查询CCAR-25及AC-91-24等规章文件,燃油系统无强制要求的非正常操作程序。

采用FMEA和FHA+FTA工作流程,建立燃油系统功能失效类程序条目清单如表4所示。

表4 功能失效类程序清单
Table 4 Function failure procedures list

来源	失效状态	程序名
	燃油泄漏	燃油泄漏
	低油面	L(R) FUEL LEVEL LO
	燃油不平衡	FUEL IMBALANCE
燃油 FMEA	发动机供油切断阀失效	L(R) ENG FUEL SOV FAULT
	交输供油阀失效	XFEED VLV FAULT
	油量数据不显示	油量数据不显示
	APU供油切断阀失效	APU FUEL SOV FAULT
	APU直流泵失效	正常程序“停机”阶段
	左机翼油箱或右机翼油箱中的两个交流泵全部失效	L(R) FUEL PUMPS FAULT
	发动机供油切断阀失效	L(R) ENG FUEL SOV FAULT
燃油 FHA	油量数据不显示	油量数据不显示
	APU供油切断阀失效	APU FUEL SOV FAULT
	燃油不平衡发生后,无法通过燃油系统恢复燃油平衡	FUEL IMBALANCE (增加步骤)

查询国产民用飞机燃油系统的“系统功能定义”以及该型号飞机其它系统的安全性分析结果,确定无机型特点类程序条目。

借鉴相似机型,参考其航线运行场景中由运行因素产生的非正常情况处置程序,判断适用于本国产民机,则建立对应的航线运行因素类程序条目,如表5所示。

表5 航线运行因素类程序清单
Table 5 Route operation factor procedures list

程序	来源	CAS信息(国产民机)	影响性分析	建议操作
所有油箱低油面	A B	L FUEL LEVEL LO 和 R FUEL LEVEL LO	每侧油箱的油量都只能供一台发动机30分钟巡航用油,此时飞机不能继续飞往目的机场。	开起交输供油,打开所有燃油泵。平衡)。建议:增加操作程序。
油箱温度低	A B C	FUEL TANK TEMP LO	可能导致燃油结冰堵塞油管,导致供油能力降低或丧失。	降低飞行高度。
中央翼油箱两个燃油泵失效或低压	A	C FUEL PUMPS FAULT	在空中,中央翼油箱燃油不可用,可能不足以完成飞行任务。	需判断外翼油箱燃油是否足够飞往目的地

迭代优化CAS信息,因操作需求和程序分析结果,认为可以新增“油量数据不显示”的CAS告警信息,以及同时包含“L FUEL LEVEL LO”和“R FUEL LEVEL LO”故障逻辑的新CAS信息“ALL FUEL LEVEL LO”。

4 结 论

1) 本文针对实际工作中飞行程序条目建立过程存在的缺陷,提出了较为完善的飞行程序建立方法。通过比对成熟机型的程序条目将程序分为四类:适航规章类、功能失效类、航线运行因素类以及机型特点类。针对不同类型的程序分别提出相应的建立方法。

2) 以“操作需求”而非“CAS信息等级”作为是否建立程序的标准,明确“借鉴相似机型”须围绕“航线运行因素”的原则,可以排除冗余告警对程序设计的影响,同时防止无CAS信息的故障处置程序被遗漏。

3) “FMEA推演”结合“FHA+FTA分析”建立功能失效类程序条目,可减少CAS设计阶段主观因素的影响,获得更准确的程序设计结果。

4) 以某国产民机燃油系统进行实例分析,验证了该方法的可行性。由于本文方法减弱了CAS设计合理程度在程序设计过程中的影响,因此程序设计结果可以用来迭代优化CAS信息,帮助飞行员更快地识别飞机故障、检索对应程序。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局飞行标准司. 航空器的运行文件: AC-91-

24[S]. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2014.

Division of Flight Standards, Civil Aviation Administration of China. Operation document of aircraft: AC-91-24[S]. Beijing: Division of Flight Standards, Civil Aviation Administration of China, 2014. (in Chinese)

[2] 姚渊. 民用飞机飞行操作程序的开发和验证[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(3): 77-82.

YAO Yuan. Development and verification of flight operation procedure for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015(3): 77-82. (in Chinese)

[3] 陆晓华. C919大型客机飞行非正常操作程序设计[J]. 科技创新与应用, 2016(27): 12-13.

LU Xiaohua. C919 large passenger aircraft abnormal operation procedure design[J]. Technology Innovation and Application, 2016(27): 12-13. (in Chinese)

[4] 王媛媛, 周瑾, 张雅杰. 民用飞机飞行机组非正常操作程序编制研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 354-358.

WANG Yuanyuan, ZHOU Jin, ZHANG Yajie. Research on the development of flight crew non-normal operating procedure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 354-358. (in Chinese)

[5] 赵苏苏. 民用飞机非正常操作程序编写流程研究[J]. 科技视界, 2017(5): 354.

ZHAO Susu. Research on the writing process of abnormal operation procedures for civil aircraft[J]. Science & Technology Vision, 2017(5): 354. (in Chinese)

[6] SAE. Fault/failure analysis procedure [R]. US: SAE, 2018.

[7] GENG Qichuan, DUAN Haibin, LI Shuangtian. Dynamic fault tree analysis approach to safety analysis of civil aircraft [J]. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011(6): 1443-1447.

[8] FUSSELL J B, ABER E F, RAHL R G. On the quantitative analysis of priority-AND failure logic[J]. IEEE Trans-

- actions on Reliability, 1976, 25(5): 324-326.
- [9] LONG W, SATO Y, Horigome M. Quantification of sequential failure logic for fault tree analysis[J]. Reliability Engineering System Safety, 2000, 67(3): 269-274.
- [10] 王超. 飞行程序运行评估的理论方法及仿真应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- WANG Chao. Research on evaluation theory and simulation application of flight procedure operation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [11] 谢辉松. 民用飞机飞行机组操作程序设计探讨[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 90-96.
- XIE Huisong. Discussion on the design of flight crew operating procedures for civil airplanes[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 90-96. (in Chinese)
- [12] 程然. 基于模型的飞机级功能危险评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- CHENG Ran. Research for model-based functional hazard assessment method at aircraft level[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [13] APARNA B M, AMBILIKUMAR C K. Advancements in failure mode and effect analysis: a review[C]// 2022 International Conference on Next Generation Intelligent Systems. US: IEEE, 2022: 1-9.
- [14] 权晓波, 王永明, 翟磊, 等. 航天产品设计关键特性“五维度”分析方法研究与实践[J]. 航天工业管理, 2022(7): 15-18.
- QUAN Xiaobo, WANG Yongming, ZHAI Lei, et al. Research and practice of “five-dimensional” analysis method for key design characteristics of aerospace products[J]. Aerospace Industry Management, 2022(7): 15-18. (in Chinese)
- [15] 陆中, 孙有朝, 周伽. 民用飞机适航符合性验证方法与程序研究[J]. 航空标准化与质量, 2007(4): 6-19.
- LU Zhong, SUN Youchao, ZHOU Jia. Airworthiness compliance approach procedure for civil aircraft[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2007(4): 6-19. (in Chinese)
- [16] 李磊, 徐世宁. 民用飞机初步系统安全性评估方法研究[J]. 科技创新导报, 2015, 12(22): 28-29.
- LI Lei, XU Shining. Reach on preliminary system safety assessment method for civil aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(22): 28-29. (in Chinese)
- [17] LI Dawei, GAO Jianguo, ZHANG Zhongyuan, et al. Research on common mode analysis method in system safety analysis[J]. Beijing: IOP Publishing, 2022.
- [18] 徐璇. 面向适航的民机系统动态故障树分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- XU Xuan. Research on dynamic fault tree analysis method of civil aircraft system for airworthiness[D]. Nanjing: Nanjing University of aeronautics and astronautics, 2018. (in Chinese)

(编辑: 丛艳娟)