

文章编号:1674-8190(2021)02-072-08

# 飞机故障的运行后果及成本分析方法

刘佳奇,冯蕴雯,薛小锋,陈俊宇  
(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

**摘要:** 系统故障的运行后果分析技术是飞机运行可靠性分析的重要分支,可为维修任务的成本效益分析提供有力支撑。为了研究飞机系统故障对运行后果及成本的影响,从系统故障运行后果的相关性分析入手,首先,梳理飞机系统故障类型和放行情况对运行后果的影响;然后,结合航线维修现行做法及事件树思想提出一种支持评估飞机系统故障的运行后果及其相关成本的方法,建立基于飞机系统故障的运行后果与成本评估模型;最后,以某型号飞机燃油系统为例,验证所提方法的可行性和适用性。结果表明:本文所提方法合理有效,可为评估故障运行后果提供支持,为飞机的设计、运行和维护提供一定的参考。

**关键词:** 系统故障;运行可靠性;民用飞机;运行后果;成本分析

中图分类号: V267

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.08

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Operational Consequence and Cost Analysis Method of Aircraft Failure

LIU Jiaqi, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, CHEN Junyu  
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Operational consequence analysis of system failure is an important branch of aircraft operational reliability analysis, which can provide strong support for cost-benefit analysis of maintenance tasks. In order to study the impact of aircraft system failure on operational consequences and costs, this study starts with the correlation analysis of operational consequences of system failures. Firstly, the impact of aircraft system fault types and release conditions on operational consequences is analyzed. Then, combined with the current practice of airline maintenance and the idea of event tree, a method to support the evaluation of operational consequences and related costs of aircraft system failures is proposed, and the operational consequence and cost assessment model based on aircraft system failure is established. Finally, the feasibility and applicability of the proposed method are verified by taking the fuel system of a certain type of aircraft as an example. The results show that the proposed method is reasonable and effective, which can provide support for evaluating the consequences of failure operation, and provide certain reference for aircraft design, operation and maintenance.

**Key words:** system failure; operational reliability; civil aircraft; operational consequences; cost analysis

## 0 引言

随着民航进入高速发展期,国内外航空市场

竞争日益激烈,在此背景下,制造商和航空公司最关心的问题之一是如何管理飞机系统故障造成的后果以及对运行过程进行管理<sup>[1-2]</sup>。对飞机系统故

收稿日期: 2020-09-04; 修回日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51875465)

通信作者: 冯蕴雯, fengyunwen@nwpu.edu.cn

引用格式: 刘佳奇,冯蕴雯,薛小锋,等. 飞机故障的运行后果及成本分析方法[J]. 航空工程进展, 2021, 12(2): 72-79.

LIU Jiaqi, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, et al. Operational consequence and cost analysis method of aircraft failure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(2): 72-79. (in Chinese)

障运行后果进行分析可为飞机维修计划的制定提供支持,降低维护成本,提高运行可靠性<sup>[3-4]</sup>。

为了提高运营支持能力,制定高效的定期维护计划,20世纪70年代美国航空业将以可靠性为中心的维护(Reliability Centered Maintenance,简称RCM)纳入MSG-3(Maintenance Steering Group-3)用于确定以最低的成本实现设备固有可靠性所必需的计划维修任务<sup>[5-6]</sup>。2014年,中国民用航空局飞行标准司发布《国产航空器的运行评审》(AC-91-10R1)<sup>[7]</sup>和《航空器制造厂家运行支持体系建设规范》(MD-FS-AEG006)<sup>[8]</sup>,为民用飞机运营支持的建设和发展指明了方向。在运行后果分析和提高运行可靠性方面国内外开展了相应的研究,并取得了一定的成果。例如,V. Ulansky等<sup>[9]</sup>研究了间歇性故障对航空电子系统的影响,评估了航空电子系统的运行可靠性和维修费用;武春燕<sup>[10]</sup>通过模拟真实的设备运行过程,评价运营方案在人员、资源配置等方面的合理性,进而对薄弱环节进行健壮性优化;孙闯等<sup>[11]</sup>针对小样本条件下航空发动机运行可靠性评估提出了有效手段;郭媛媛等<sup>[12]</sup>通过分析民用飞机运行风险研究现状,给出故障模式影响分析方法和故障树分析方法相结合的风险评估方法;Gao X等<sup>[13]</sup>分析了影响运行可靠性的因素、影响因素和控制变量之间的映射关系;In-Tak Jo等<sup>[14]</sup>采用可靠性和运行成本改进矩阵编制了可靠性和运行成本改进指标;郭媛媛等<sup>[15]</sup>建立了单机风险和机队风险计算方法,分析了部件故障引起的单机风险水平和机队风险水平;王冠茹<sup>[16]</sup>深入分析了民用飞机运营事件的特征与来源,对事件进行分类并建立了运营事件的处理方法。虽然上述研究工作围绕系统故障和运行风险问题从不同角度进行了研究,但仍存在诸多不足之处:大多数研究仅针对特殊问题提出了解决办法,考虑的影响因素较少,其适用范围受到限制。对民用飞机而言,对飞机系统故障运行后果进行分析需要考虑多方因素的影响,同时要结合民用飞机运行情况将系统故障与运行后果建立联系以形成体系化的可靠性管理和运营支持方案。

为了解决上述问题,本文基于飞机系统故障对其运行后果和成本进行分析,结合事件树分析提出一种支持评估飞机系统故障的运行后果

及其相关成本的方法,对飞机系统故障类型和放行情况对运行后果的影响进行梳理,结合航线维修现行做法研究飞机运行后果的可能情景,并以某型号飞机燃油系统为例对所提方法的可行性和有效性进行验证。

## 1 飞机故障的运行后果

### 1.1 具有运行后果的故障模式

本文对具有运行后果的故障模式定义为:可能会降低飞机的运行能力从而无法满足飞机运行中预期功能和性能要求的故障表现形式。例如影响飞机飞行高度、飞行距离、最大起飞重量、着陆或飞机常规使用的故障被认为对运行能力有不利影响,这些事件的发生可能导致航班延误或取消等运行后果。

如果运行能力受到影响,机组须参考异常或紧急机组检查表(Abnormal or the Emergency Crew Check Lists)进行处理。根据不同情况,故障对运行能力的不利影响需要采取的措施为:签派之前排除故障、施加运行限制、使用异常或紧急程序等。

通常,评估飞机在发现特定类型的故障后是否签派运行需要查询最低设备清单(Minimum Equipment List,简称MEL)和操作手册等。运营人根据最低设备清单判断故障是无条件放行、有条件放行还是不允许放行。无条件放行即上述文件允许飞机在某些项目不工作的情况下继续正常运行,可以将排除故障的工作推迟到适当的时间;有条件放行即需要在飞行前进行一些操作。

### 1.2 运行后果的影响因素

根据不同的故障类型确定的放行任务对飞机运行后果影响不同。如果确定为无条件放行,故障不会产生运行后果。如果确定为有条件放行,相应的操作需要消耗时间,可能会影响飞行时间,也可能会降低飞机的运行能力。无条件放行和有条件放行也可能在后续运行中出现额外故障而带来风险。存在需立即排除的故障而不允许放行的情况也不一定会中断正常运行。例如飞机系统中的故障可以在航线的正常中转时间内排除,则不会导致后续航班延误或取消。在这种情况下,

产生的唯一后果是维护费用增加。这可以通过良好的可靠性或维修性来降低费用,例如通过设备冗余、模块化设计、航线可更换单元(Line Replaceable Unit,简称LRU)、机内自检设备(Built-in Test Equipment,简称BITE)等来减少停机维护时间<sup>[17-18]</sup>。飞机系统故障运行后果的影响因素如图1所示。

具有运行后果的故障可能会对地面或空中造成不同的运行影响,对地面的影响可能包括与飞行签派、地面折返和航班取消有关的延误;对空中

的影响可能包括空中折返、复飞、备降等。这些后果会导致直接的经济损失,例如飞行机组人员加班、食宿费用,机场地面设备和登机口工作人员加班费及停机坪费用,飞机燃料消耗、使用和维护费用,导航费用,旅客食宿费用等;此外,可能造成累积问题。

故障模式运行后果的严重程度主要取决于故障的类型和性质、故障发生的飞行运行阶段、排除故障所需时间、飞机的大小和类型、运营航空公司的管理政策及其维护支持系统等。

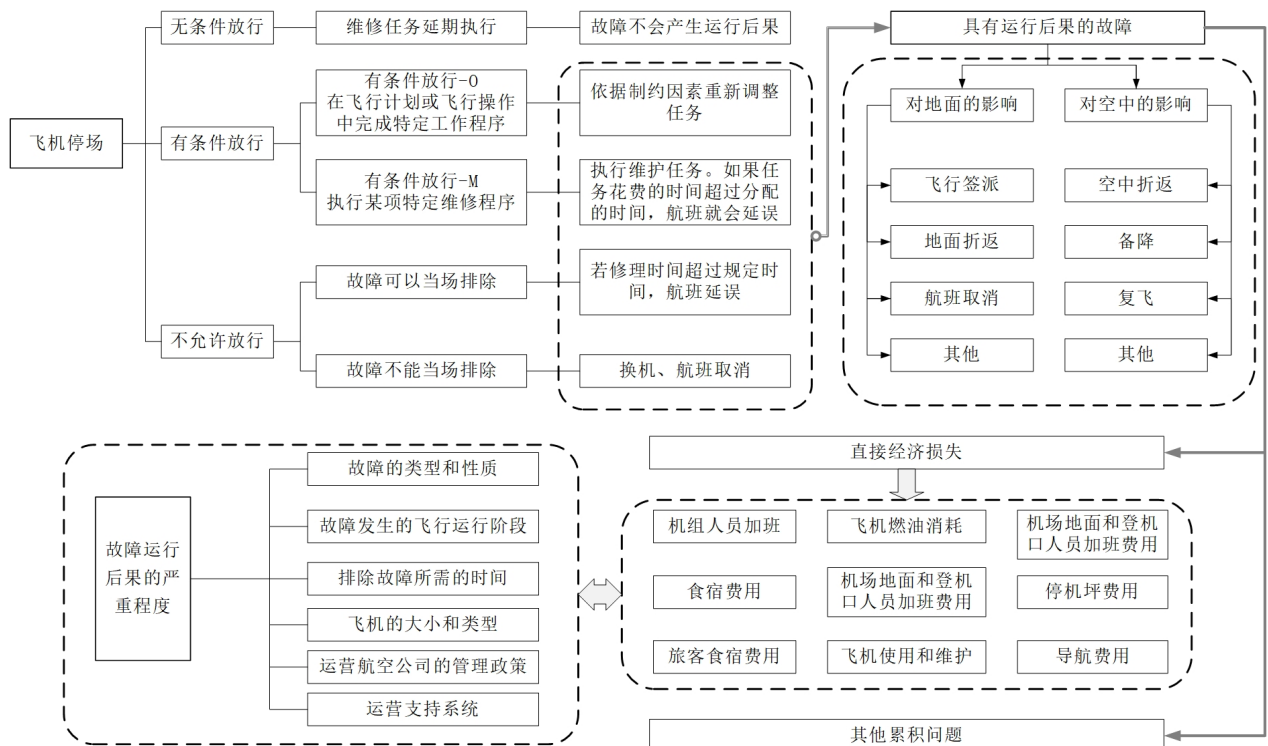


图1 飞机系统故障运行后果的影响因素

Fig. 1 Influencing factors of operational consequences of aircraft system failure

## 2 系统故障的运行后果及成本评估方法

### 2.1 航线维修的现行做法

按可延期处理和不可延期处理对飞机故障进行分类。可延期处理的故障是指对飞机安全而言不重要的故障,即飞机可以在故障存在的情况下继续正常飞行。对于以最低设备清单可以保留但是会增加机组工作量的故障,需要飞行前进行一定的修复,使得部件的失效数目在许可范围内。对于不能及时在修复期限内完成修理的故障,需

要通过适航当局批准后才可保留,若在延长期限内仍然不可以被修复则需要禁止运营<sup>[19-20]</sup>。如果签派前在地面上发生任何故障,由机长报告,机务工程师根据飞行员报告排除故障。在这种情况下,需要依据MEL评估故障是否可延期处理。MEL允许某些部件在功能丧失但不影响安全情况下飞行,根据项目的不同,MEL可能要求在必须进行维护之前采取额外的限制。

在无条件放行情况下如果MEL允许飞机在某些项目不工作的情况下继续服务,并且飞行员同意在这种情况下飞行,排除故障的工作将推迟

到适当的时间,故障不会产生任何运行后果。在某些情况下,MEL允许飞机在某些部件不工作的情况下飞行,但它施加了某些类型的运行限制,如速度限制、高度限制或对特定系统的使用限制。在这种情况下,飞机运行能力降低,导致运行成本增加,主要是由于飞行距离或燃油消耗增加所导致的。在某些情况下,MEL允许飞机在某些部件不工作的情况下飞行,但它要求维修人员和/或机组人员采取一些措施,如图2所示。若采取相应措施时间较长可能会影响航班运行的规律性。此外,飞机可能会在某种类型的故障情况下运行,但随着其运行能力的降低需要采取运行限制,可能导致额外的运营成本,主要是增加油耗或增加飞行时间。

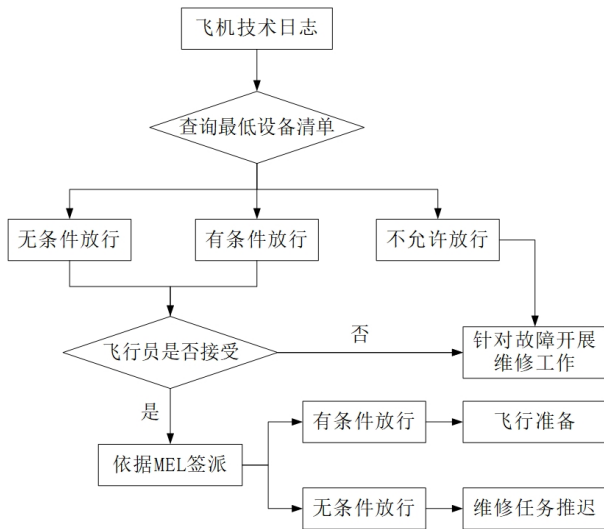


图2 参考MEL的非计划性维修程序

Fig. 2 Unscheduled maintenance and MEL procedure

当故障发生在飞行中,若故障不影响飞行,飞行员通过飞机技术日志中的驾驶员报告记录故障,当飞抵下一个机场时,维修工程师根据上述驾驶员报告开展故障排除工作。若故障影响飞行,需要飞行员查阅飞行手册(Flight Manual,简称FM)、飞行机组操作手册(Flight Crew Operating Manual,简称FCOM)、快速检查单(Quick Reference Handbook,简称QRH)或依据其经验采取一些措施。在此种情况下,可能需要一些运行限制,或者由于故障需要立即维修而禁止飞机继续运行。根据发生故障的飞行阶段,后一种情况可能需要飞行员执行:中止起飞、空中折返、复飞、备降至其他机场等。

## 2.2 事件树分析方法

为了说明飞机故障的运行后果,结合事件树分析方法(Event Tree Analysis,简称ETA)来研究飞机系统故障运行后果的事件组合。故障的失效过程从一组基本事件开始,这些事件被称为初始事件。在本文中,作为失效初始原因的初始事件被称为失效模式,其定义为:导致特定功能失效的特定物理条件或状态,可能包括人为错误、技术项目故障、环境影响<sup>[21]</sup>。

初始事件是不良运行后果的开始。要考虑的损失和运行后果可能包括生命健康损失、空气和噪声污染、高维修成本、系统或设备损坏、延误或航班取消等。以可靠性为中心的维修可被视为一种可靠性和风险管理方法,因为它旨在降低故障发生率,并减少可能的后果<sup>[22]</sup>。风险分析最重要的部分是风险识别。已经被识别出来的风险才能以系统的方式进行管理。风险识别后进行风险评估,做出适当的维护决策以确保系统处于安全状态<sup>[23]</sup>。常见的风险识别归纳方法有:故障模式与影响分析(Failure Mode and Effect Analysis,简称FMEA)、初步危害分析(Preliminary Hazards Analysis,简称PHA)和事件树分析<sup>[24]</sup>。

## 2.3 飞机故障运行后果及成本分析方法

本文提出的飞机故障运行后果及成本分析方法将系统可能发生的某种事故与导致事故发生的各种原因之间的逻辑关系用一种树形图表示,以识别在始发事件发生后导致特定后果发生的事件序列。通过对事件树的定性与定量分析,可以进行故障诊断、分析系统的薄弱环节、指导系统的安全运行、实现系统的优化设计等<sup>[25-26]</sup>。

树形图中所涉及的概率是条件概率,即后续事件在前一事件已发生条件下的发生概率。每个事件路径的结果都显示在每个序列的末尾。可能存在的情况有:整个事件路径是成功的、失败的、最初成功但后来失败的等。树形图的每个序列的逻辑表示也可以用布尔表达式形式显示。通过使用布尔代数规则,得到每个分支的逻辑表示,并最终得到每个运行后果。

系统故障导致的运行后果受到以下因素的影响:飞机正常运行期间故障被发现的可能性,故障的类型,某些项目不工作的情况下继续飞行的可

性能,发生故障的飞行阶段,飞行员的决策。基于上述讨论,确定两组状态共同在树形图中表示:发

生故障的运行阶段和故障对运行能力的影响。系统故障可能引起的运行后果如图 3 所示。



图 3 飞机系统故障可能导致的运行后果的事件树

Fig. 3 Event tree of operational consequences of aircraft system failures

第一组状态包含五种,这组状态表示故障发生的阶段,包括签派之前(S1)、起飞阶段(S2)、爬升阶段(S3)、巡航阶段(S4)、进近和着陆阶段(S5)。在每个阶段中,可能会发生两种不同的事件,即发生故障或不发生故障。“是”表示故障发生在该阶段,“否”表示故障不发生在该阶段。第二组状态包括三种,用来表明故障对飞机运行能力的影响。第一种状态表示故障需要立即采取措施的情况。“是”意味着故障不会对运行能力产生任

何直接影响,即所需的纠正性维护可以推迟;“否”表示需要立即采取措施,即所需的维护工作或运行程序不可延迟。第二种状态描述实施运行限制的必要性。“是”表示需要一些运行限制,“否”表示没有运行限制。第三种状态描述是否采取紧急或异常程序。“是”表示必须进行紧急或异常运行,“否”表示不需要紧急或异常程序。分别用N1、N2、N3表示三种状态,N1为“可延期”,N2为“运行、操作限制”,N3为“使用异常程序”。这两组状

态作为事件树的输入,都与失效和功能特性有关。

本文假设分析中只包括可能产生运行或经济后果的故障影响。如果故障有任何运行后果,则它应该很容易被机组人员发现。在运行阶段和运行能力两组状态下,不同事件的组合将产生不同的情况,进而决定最终的运行后果。根据可能的事件组合,确定25种不同的场景,将导致以下后果分类:无运行后果、空中和/或地面延误、紧急或异常运行。

在已确定的25种不同场景中,有6种场景没有产生运行后果。其中场景F1是故障从未发生,五种场景(A2、B2、C2、D2、E2)故障的相关维护是可推迟的且没有必要的运行或异常限制。因此,这五种情况的唯一区别是发生故障的运行阶段。

有14种场景的后果造成延误,为场景A1、A3、A4、B1、B4、B5、C1、C4、C5、D1、D4、D5、E1和E5。其中,有五种场景运行后果仅表现为空中延误,即场景A1、B1、C1、D1和E1。这五种场景与可延期处理但需要运行限制的故障相关。

使用紧急或异常程序会导致场景B3、C3、D3和E3中的运行后果。所有这些场景都与具有某种运行限制的不可延期的故障有关,并且需要机组人员采取紧急程序和异常程序。以上四个场景的主要区别是发生故障的飞行阶段。在场景B3和C3中,故障分别发生在起飞阶段和爬升阶段,在场景D3和E3中,故障分别发生在巡航阶段和进近着陆阶段,导致返航、改道或复飞等。还有一些情况,如场景E4,飞机处于着陆模式,一些系统突发故障可能会降低飞机完成着陆任务的能力,飞行员可以执行复飞。

### 3 案例分析

以某型飞机燃油系统为例对本文所提出的飞机故障运行后果及成本分析方法进行验证。燃油系统主要用于存储飞机所需的燃油,并保证在任何飞行状态和工作条件下都能向发动机和辅助动力装置提供工作所需的燃油,同时保证飞机飞行所需的重心位置变化要求。飞机燃油系统主要由存储系统、供输油系统、燃油管理及指示系统构成。其中供油和输油分系统由油泵、管路、控制阀、传感器等组成<sup>[20]</sup>。

飞机燃油系统可能出现的故障之一为“左右

油箱油量指示错误”。油箱油量指示器安装数量为2,签派或放行所需数量为0。设备没有适航要求外的冗余,可以通过有效的程序或方法实现功能。失效的影响为:油箱油量指示器错误会导致无法准确测量相应油箱的油量,进而使油量测量精度降低。这种故障不会导致危险或灾难性事件发生。在实际操作中,允许两个油箱油量指示器不工作,但使用适当程序验证中央油箱燃油量,机组可以有条件进行放行。如果起飞前油箱油量指示器不能正常工作,机组可以人工输入当前飞机上的油量来计算参照速度或到达目的地燃油剩余并定时进行人工更新,以保持信息有效<sup>[20]</sup>。驾驶舱显示装置上会出现一条警告信息,以便飞行员在起飞前意识到故障。因此,起飞前故障检测的条件概率为100%,该故障被归类为具有运行后果的明显故障。根据上述分析,情况是A1号,这将导致运行后果——空中延误。为了量化运行后果发生的速率,失效频率应乘以不同运行阶段发生该故障的条件概率,以及故障对运行能力不利影响的条件概率:

$$R_i = \lambda \times P_1 \times P_2 \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为某种运营后果情景的发生率; $P_1$ 为条件1中状态的条件概率; $P_2$ 为条件2中状态的条件概率。

“左右油箱油量指示错误”故障率为 $2.47 \times 10^{-7}/\text{fh}$ 。标准1中状态的条件概率(签派之前)估计为100%,因为在起飞前机组人员会很明显地发现故障。根据最低设备清单,标准2中状态的条件概率估计为100%,因为故障是可延迟的,第A1种情况下左右油量指示错误的发生率为

$2.47 \times 10^{-7}/\text{fh} \times 100\% \times 100\% = 2.47 \times 10^{-7}/\text{fh}$   
每架飞机每年的该场景成本为

$$C_a = R_c \times C_d \times T_d \times P_y \quad (2)$$

式中: $C_a$ 为每架飞机每年的场景成本(元/年); $R_c$ 为每个飞行小时该场景发生率; $C_d$ 为每个飞行小时起飞时空中延迟的单位成本; $T_d$ 为延迟时间; $P_y$ 为平均年利用率(飞行小时/年)。

为了估算相关后果的成本,可以将平均成本用于不同的运营后果。对于场景A1这种特定情况,根据经验丰富的从业人员的建议,所做的假设为空中延误时间0.5h,单位时间内空中延误花费19200元/小时。根据式(2),可以估算出整个飞机每种后果情景的年总成本。因此,考虑到每年

3 500 h 的利用率, 场景 A1 的年成本估计为  $2.47 \times 10^{-7} / \text{fh} \times 0.5 \text{ h} \times 19\,200 \text{ 元/h} \times 3\,500 \text{ fh/年} \approx 8.3 \text{ 元/年}$ 。

## 4 结 论

(1) 本文提出了一种评估飞机系统故障的运行后果及其相关成本的方法, 运用该方法分析了飞机系统故障对运行后果的影响, 结合实例进行分析, 验证了所提方法的可行性和有效性。

(2) 本文所提出的方法可为评估故障运行后果提供支持; 在制定飞机维修计划的过程中, 为维修任务成本效益分析提供支持, 给飞机的设计、运行和维护提供一定的参考。

### 参 考 文 献

- [1] PESCHIERA F, DELL R, ROYSET J, et al. A novel solution approach with ML-based pseudo-cuts for the flight and maintenance planning problem[J]. *Operations Research-Spektrum*, 2020(1): 181.
- [2] LINDNER M, ROSENOW J, FOERSTER S, et al. Potential of integrated flight scheduling and rotation planning considering aerodynamic-, engine- and mass-related aircraft deterioration [J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, 10(3): 1-16.
- [3] 马小骏. 面向客户服务的民用飞机健康管理系统的若干问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
MA Xiaojun. Research on problems of civil aircraft health management system oriented to custom service[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [4] 李怀远. 基于可靠性的民用飞机计划维修的决策方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
LI Huaiyuan. The decision-making on scheduled maintenance of civil aircraft based on the reliability[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [5] Antonio Jesús Guillén López, Adolfo Crespo Márquez, MacchiMarco, et al. Prognostics and health management in advanced maintenance systems [M]. Berlin: Springer, 2018: 79-106.
- [6] BRAUER D C, BRAUER G D. Reliability-centered maintenance [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, 36(1): 17-24.
- [7] 中国民用航空局. 国产航空器的运行评审: AC-91-10R1 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.  
Civil Aviation Administration of China. Operation review of domestic aircraft: AC-91-10R1 [S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- [8] 中国民用航空局. 航空器制造厂家运行支持体系建设规范: MD-FS-AEG006[S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.  
Civil Aviation Administration of China. Standard for construction of operational support system of aircraft manufacturers: MD-FS-AEG006[S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- [9] ULANSKY V, RAZA A. Modelling of operational reliability and maintenance cost for avionics systems with permanent and intermittent failures [C]// The 9th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability. London: Imperial College, 2016: 185-192.
- [10] 武春燕. 设备运行可靠性评估与维修优化方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
WU Chunyan. Research on the reliability evaluation and the maintenance optimization method of the equipment [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [11] 孙闯, 何正嘉, 张周锁, 等. 基于状态信息的航空发动机运行可靠性评估[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 30-37.  
SUN Chuang, HE Zhengjia, ZHANG Zhou suo, et al. Operating reliability assessment for aero-engine based on condition monitoring information[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 30-37. (in Chinese)
- [12] 郭媛媛, 李龙彪, 胡宇群, 等. 民用飞机运行风险评估方法[J]. *航空工程进展*, 2016, 7(2): 253-258.  
GUO Yuanyuan, LI Longbiao, HU Yuqun, et al. Operation risk assessment method of civil aircraft[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2016, 7(2): 253-258. (in Chinese)
- [13] GAO X, WU H, DU M, et al. Research on the operational reliability system control methodology and its application for aerospace mechanism[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(6): 536-545.
- [14] JO In-Tak, CHEON Lee Sang, HUN Park Jong, et al. A study on reliability evaluation and improvement process of aerospace electronic equipments using operational reliability-cost matrix [J]. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2014, 42(4): 633-646.
- [15] 郭媛媛, 孙有朝, 李龙彪. 基于蒙特卡罗方法的民用飞机故障风险评估方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(10): 150-158.  
GUO Yuanyuan, SUN Youchao, LI Longbiao, et al. Failure risk assessment method of civil aircraft based on Monte Carlo method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(10): 150-158. (in Chinese)
- [16] 王冠茹. 民用飞机运营事件风险评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
WANG Guanru. Research on risk assessment methods of civil aircraft operational occurrence [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [17] 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): 147-158,166.
- 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): 147-158,166. (in Chinese)
- [18] 陈俊宇, 冯蕴雯, 郭英男, 等. 民用飞机LRU划分的双步迭代层次分析法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 479-486.
- CHEN Junyu, FENG Yunwen, GUO Yingnan, et al. LRU division of civil aircraft based on two-step iterative analytic hierarchy process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 479-486. (in Chinese)
- [19] 付洁. 基于MSG-3的维修任务单元重构优化策略的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- FU Jie. On the strategy for reconstructing and optimizing the maintenance task units based on MSG-3[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)
- [20] 汪震宇. 面向签派可靠度的MMEL制定技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- WANG Zhenyu. Dispatch reliability oriented MMEL formulation technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [21] 罗凤娥, 李珊, 千富荣, 等. 基于飞行签派员的航空公司运行效率提升研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 132-139.
- LUO Feng'e, LI Shan, QIAN Furong, et al. Research on airline operation efficiency improvement base on flight dispatcher[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 132-139. (in Chinese)
- [22] CHENG Z, JIA X, GAO P, et al. A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(6): 806-814.
- [23] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理的核心技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
- WANG Shaoping. Prognostics and health management key technology of aircraft airborne system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1459-1472. (in Chinese)
- [24] 鲍晗. 民机发动机控制系统持续适航风险评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- BAO Han. Research on risk assessment technology of aero-engine control system for continued airworthiness[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [25] PURBA J H, TJAHYANI D T S, WIDODO S, et al. Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 125: 103376.
- [26] Elisabeth Paté X ornell M. Fault trees vs. event trees in reliability analysis[J]. Risk Analysis, 2010, 4(3): 177-186.

#### 作者简介:

刘佳奇(1993—),男,硕士。主要研究方向:可靠性维修性工程。

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

薛小锋(1983—),男,博士,副研究员。主要研究方向:疲劳寿命可靠性及维修性。

陈俊宇(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:维修性工程。

(编辑:马文静)