

文章编号:1674-8190(2022)06-088-09

# 商用飞机持续适航事件经济性分析模型

王燕玲<sup>1,2</sup>, 宋文滨<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

(2. 上海飞机设计研究院 适航工程中心, 上海 201210)

**摘要:** 我国某型民用飞机于2015年开始陆续交付运行, 积累了大量的持续适航事件和数据, 但缺少量化的评价机制用于持续适航事件的经济性分析。通过对民用飞机持续适航事件和数据的收集与分析, 结合对主制造商和航空公司的成本和收益损失的计算, 提出持续适航事件成本结构; 在此基础上, 建立单个事件的成本模型和持续适航事件经验曲线模型, 进一步提出预测机型成熟期的持续适航事件成本预测模型并进行验证。结果表明: 在机队持续适航成本预测模型使用的过程中, 飞机停放天数、事件接收到确定措施时间和措施实施时间的取值敏感度高, 在后续机队的运行过程中, 应尽量减小这三个参数的取值, 以降低持续适航事件成本。

**关键词:** 商用飞机; 持续适航事件; 成本; 经济性分析; 经验曲线

中图分类号: V221<sup>+</sup>.91

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Economic Analysis Model of Continuous Airworthiness of Commercial Aircraft

WANG Yanling<sup>1,2</sup>, SONG Wenbin<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Airworthiness Engineering Center, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** A certain type of civil aircraft made in China is delivered and operated successively since 2015, and a large number of continuous airworthiness events and data are accumulated, but there is a lack of quantitative evaluation mechanism for economic analysis of continuous airworthiness events. Through the collection and analysis of continuous airworthiness events and data of civil aircraft, combined with the calculation of costs and benefits loss of main manufacturers and airlines, the cost structure of continuous airworthiness events is proposed. On this basis, the cost model of a single event and the experience curve model of continuous airworthiness events are established. And the cost prediction model of continuous airworthiness events for predicting the maturity of aircraft models is further proposed and verified. The results show that, in the using process of the proposed prediction model of aircraft fleet continuous airworthiness cost, the number of aircraft parking days, time interval between receiving events and determining actions, measure implementation time are highly sensitive. In the operation process of subsequent aircraft fleet, the values of these three parameters should be reduced as much as possible to reduce the cost of continuous airworthiness events.

**Key words:** commercial aircraft; continuous airworthiness events; cost; economic analysis; experience curve

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-01-18

通信作者: 王燕玲, wangyanling@comac.cc

引用格式: 王燕玲, 宋文滨. 商用飞机持续适航事件经济性分析模型[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 88-96.

WANG Yanling, SONG Wenbin. Economic analysis model of continuous airworthiness of commercial aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 88-96. (in Chinese)

## 0 引言

民用航空器的适航性是研制的航空器应该具有的一种安全特性,这种特性是指航空器能在预期的使用环境中规定的限制条件下具有安全运行的能力<sup>[1]</sup>。而要保证飞行安全,最关键的就是保证航空器的持续适航。针对民用航空器的持续适航研究大多聚焦于安全性和维修性方面<sup>[2-6]</sup>,王伟等<sup>[7]</sup>、林家冠等<sup>[8]</sup>分别针对民用飞机发动机的维修间隔和飞机持续适航过程进行了分析。更进一步,以持续适航事件和数据为基础,建立持续适航事件成本结构,提出持续适航事件成本预测模型并进行经济性分析,对整个机队的商业运营具有重要的意义。

在持续适航工作方面,波音公司和空客公司都较早建立了评估体系以保障飞机的安全运行,同时,也从经济性的角度,在飞机的方案评估、飞机设计、制造工艺等飞机设计方面对飞机进行评估,以提高飞机的市场竞争力<sup>[9]</sup>,但都缺少对持续适航事件的成本预测工作以及对持续适航事件的经济性分析。

我国自主研发的首款民用飞机已于2015年开始陆续交付运行<sup>[10]</sup>,截止到2020年底,某型飞机交付运营数量已达41架,机队累计飞行42 700 h,实现了安全运行的基本目标。自这款飞机首架交付之日起,其持续适航体系正式运行,持续不断地开展事件的收集,并基于ARP5150等细化的风险矩阵来进行风险评估<sup>[11-13]</sup>,依据ICAO Doc 9859《安全管理手册》中定义的通用的安全风险缓解措施类型细化制定改正/改进措施<sup>[14]</sup>,并将依据冈斯顿方法计算的不安全措施时限贯彻于整个机队<sup>[15]</sup>,实现了保障机队安全运行的基本目标。

主制造商以持续适航体系为依托,开展了大量的设计优化、培训等工作,积累了大量持续适航事件的数据和经验,飞机的运行也逐步得到市场的正向反馈,但仍然缺少量化的评价机制,对后续机型研制和持续适航事件的处置难以产生比较全面的指导性参考,尤其缺乏对持续适航事件经济性的考虑。

本文以某型民用飞机的持续适航事件为基础,通过大量的数据搜集、梳理和分析,建立单个持续适航事件的成本模型,在此基础上建立持续适航事件经验曲线模型并分析原因,提出持续适

航事件成本预测模型。

## 1 事件和数据收集

### 1.1 事件和数据收集概况

从某型民用飞机首架交付运行至2020年底,共接收报送事件900多项,各年度事件数量与机队规模情况分布如图1所示。

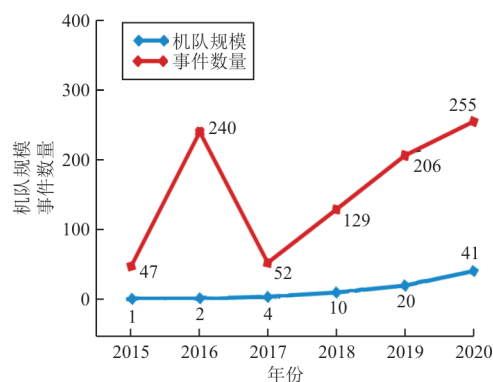


图1 历年事件数量与机队规模分布

Fig. 1 Number of incidents and fleet size distribution

对900多项事件进行持续适航安全风险评估,风险水平判定为无需采取措施的600项左右;另外,需采取措施的91项,状态可容忍的219项,共计310项持续适航事件需进一步开展工作。

进行持续适航事件收集的同时,也对该型民用飞机逐年的客户数量、机队规模、持续适航事件数量(共310项)进行整理和统计,数据结果如表1所示。

表1 某型民机运行数据整理和统计

Table 1 Collation and statistics of operation data of a certain type of civil aircraft

年份	客户数量	机队规模	持续适航事件数量
2015	1	1	23
2016	1	2	79
2017	1	4	23
2018	1	10	55
2019	2	20	50
2020	6	41	80

### 1.2 事件和数据信息来源

当前900多项持续适航事件的收集主要包括5方面的信息来源:

(1) 运行/维修信息(机组报告、维修信息、运

行信息、使用困难报告、事故报告)；

(2) 设计信息(设计分析和实验中发现的问题、供应商提供的信息、飞行试验和地面试验中发生的问题、设计质量复查中发现的问题、后续型号研发过程中发现前型号的设计问题)；

(3) 客户服务信息(培训、支援过程中发现的影响或可能影响飞机安全的信息)；

(4) 制造信息(生产过程中发现的问题、质量偏离、试验中发生的问题)；

(5) 局方信息(规章修订草案、适航指令、关于非型号/型号合格证持有人的航空器信息报告)。

### 1.3 事件和数据技术特征分析

#### 1.3.1 事件信息结构化

经过梳理,对持续适航事件信息进行结构化,包括发生阶段、发生位置、事件类型以及机组告警系统(CAS)信息等。其中,发生阶段分为航前检查、航后检查、航线运营、地面维护、区域检查、设计、制造安装、试验、定检、供应商等。

持续适航事件的发生位置包括飞控系统、电气线路互联系统(EWIS)、燃油箱、液压系统、后附件舱门等,事件类型包括CAS告警、不符合工艺规范、导线破损、数据库过期等。

#### 1.3.2 ATA 章节

梳理的310项持续适航事件,按ATA章节<sup>[16]</sup>可分为33个ATA章节,其中,事件分布比较多的章节有27、28、32、25、24等。

#### 1.3.3 原因分类

针对梳理的310项持续适航事件进行原因分类,包括设计、制造、设计+制造等。设计类事件共190项,占比61.2%,因此,在改正/改进措施方面,有非常多的设计优化和设计更改,符合该型飞机当前的运营阶段技术特征。

#### 1.3.4 数据分析

通过分析图1和表1可以得出,随着某型飞机交付数量的不断增加,客户数量和机队规模不断扩大,持续适航事件数量在飞机交付运行初期呈倍数关系上涨,在2017—2019年,随着客户数量和机队规模的扩大,持续适航事件数量较2016年有回落,而2020年有稍许上升。

随着客户数量和机队规模的扩大,持续适航事件数量也并未呈倍数增长,随着飞机运行过程中事件的收集、处置、改正/改进措施的制定和贯

彻,运行经验和数据有效地传递到了后续的运行环节甚至设计环节,即某型民用飞机的运行过程经验曲线起到了积极性的作用。

## 2 持续适航事件经济性分析

### 2.1 持续适航事件成本计算依据

持续适航事件成本包括主制造商成本和航空公司成本<sup>[17]</sup>,主制造商成本包括人工费、采购费(生产线飞机)、差旅费和管理费;航空公司成本包括航空公司收入损失、人工费、采购费(在役飞机)。

持续适航事件成本计算依据如表2所示,其中航班上座数按65计算。

表2 持续适航事件成本计算依据  
Table 2 Basis for cost calculation of continuous airworthiness events

成本	计算方式
人工费	人工费=实际工时数×人工费率。 人工费率:145元/小时(按工作5年,年薪30万计)
差旅费	调研人次×出差费用,按3000元/人次计算
管理费	按人工费、采购费(生产线飞机)、差旅费总和的10%计算
航空公司收入损失	航空公司收入损失=停场天数×票价×航班数量×65

### 2.2 持续适航单个事件成本模型的建立

#### 2.2.1 成本模型的建立

参考飞机制造商和航空公司的运营成本模型方法(AEA方法<sup>[18]</sup>),本文提出持续适航事件成本结构,如图2所示。

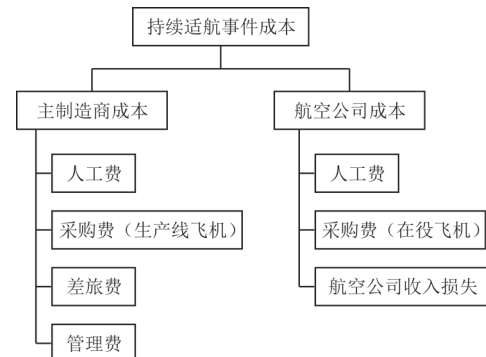


图2 持续适航事件成本结构

Fig. 2 Cost composition of continuous airworthiness events

根据计算依据,对310项持续适航事件逐项进行成本模型的建立。由于商业因素,在发展成本模型的过程中,对使用的成本数据进行适当处理,并非真实成本,但是不失代表性。

主制造商成本中:

$$C_{\text{主人工}} = 8 \times 145 \times (t_{\text{确定}} \times \phi_1 + t_{\text{实施}} \times \phi_2) \quad (1)$$

$$C_{\text{采购}} = C_{\text{单}} \times n \quad (2)$$

$$C_{\text{差旅}} = 3000 \times r_1 \quad (3)$$

$$C_{\text{管理}} = (C_{\text{主人工}} + C_{\text{采购}} + C_{\text{差旅}}) \times 10\% \quad (4)$$

$$C_{\text{主}} = C_{\text{主人工}} + C_{\text{采购}} + C_{\text{差旅}} + C_{\text{管理}} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{主}}$ 为主制造商成本; $C_{\text{主人工}}$ 为主制造商人工费; $C_{\text{采购}}$ 为生产线飞机采购费用; $C_{\text{差旅}}$ 为差旅费; $C_{\text{管理}}$ 为管理费; $C_{\text{单}}$ 为采购单价; $t_{\text{确定}}$ 为事件接收到确定措施时间; $t_{\text{实施}}$ 为措施实施时间; $\phi_1$ 为设计人员当量; $\phi_2$ 为制造人员当量; $n$ 为生产线飞机采购数量; $r_1$ 为出差人次。

航空公司成本中:

$$C_{\text{客人工}} = 8 \times 145 \times r_2 \times t_{\text{维修}} \quad (6)$$

$$C_{\text{客采购}} = C_{\text{单}} \times n_{\text{客}} \quad (7)$$

$$C_{\text{损失}} = 1100 \times 65 \times t_{\text{停场}} \times n_{\text{航班}} \quad (8)$$

$$C_{\text{客}} = C_{\text{客人工}} + C_{\text{客采购}} + C_{\text{损失}} \quad (9)$$

$$C = C_{\text{主}} + C_{\text{客}} \quad (10)$$

式中: $C$ 为持续适航事件成本; $C_{\text{客}}$ 为航空公司成本; $C_{\text{客人工}}$ 为航空公司人工费; $C_{\text{客采购}}$ 为航空公司采购费用; $C_{\text{损失}}$ 为航空公司收入损失; $C_{\text{客采购}}$ 为航空公司采购费用; $t_{\text{维修}}$ 为维修时间; $t_{\text{停场}}$ 为停场时间; $n_{\text{客}}$ 为在役飞机采购数量; $n_{\text{航班}}$ 为每天航班数量; $r_2$ 为维修人员数量。

### 2.2.2 取值的敏感性分析

根据计算过程分析得出:

(1) 事件接收到确定措施时间和措施实施时间的取值对主制造商成本计算结果的影响比较大,即取值敏感性较高;

(2) 停场天数的取值对航空公司成本计算结果的影响非常大,即取值敏感性很高。

为了避免单个事件成本模型准确度的偏离,在持续适航单个事件成本模型建立的过程中,事件接收到确定措施时间、措施实施时间以及停场天数等敏感性高的数据,都取值于某型民用飞机运行过程中的真实数据。

## 2.3 持续适航事件成本经验曲线的建立

### 2.3.1 成本经验曲线

1966年,波士顿咨询集团(BCG)的创立者和

主席 B. D. Henderson<sup>[17]</sup>在针对很多种产品进行成本研究时,发现在产品生产中,产品成本的变化规律也类似于学习曲线,即当产品的产量累积到一定数量时,产品产生的单位成本会呈现持续下降的走势。

在工业领域,产品的生产普遍遵循经验曲线的规律,即随着产品产量的积累,产品的单位成本会逐步下降。经验曲线是指随着产品产量的增加,改善工作方法,提高生产效率,以实现降低产品的单位成本。对于特定型号的飞机运行成本,经验曲线同样适用。

文献[17]提出了经验曲线的原理,将该经验曲线原理应用于本文的持续适航事件成本分析,可以得到:

$$y = ax^{-k} \quad (a > 0, k > 0) \quad (11)$$

式中: $y$ 为产品单位成本,本文指单架飞机持续适航事件成本; $a$ 为第一件产品成本(即 $x=1$ 时的值); $x$ 为积累产量,本文指机队规模; $k$ 为经验系数。

首架飞机于2015年较晚时间交付,因此2015年成本金额并不能作为第一件成本,选取2016年成本(百万元)进行计算作为第一件产品成本,即:

$$a = \frac{53.3}{2} = 26.65。$$

根据整理和统计的数据,分别将2017—2020年数据代入公式(11),计算过程如下:

$$2017\text{年}: 26.65 \times 4^{-k_1} = \frac{11.2}{4}, \text{得到 } k_1 = 1.6;$$

$$2018\text{年}: 26.65 \times 8^{-k_2} = \frac{86}{8}, \text{得到 } k_2 = 0.4;$$

$$2019\text{年}: 26.65 \times 21^{-k_3} = \frac{97.2}{21}, \text{得到 } k_3 = 0.6;$$

$$2020\text{年}: 26.65 \times 45^{-k_4} = \frac{106}{45}, \text{得到 } k_4 = 0.6。$$

2019和2020年,随着客户数量和机队规模的不断扩大,该型民用飞机运行经验曲线也趋于稳定,因此,取 $k=0.6$ 。

因此,该型民用飞机近几年的经验曲线公式为: $y = 26.65x^{-0.6}$ ,根据经验曲线公式制作的经验曲线为单架机持续适航事件理论值曲线,根据收集的数据制作的经验曲线为单架机持续适航事件实际值(机队平均值)曲线,如图3所示。



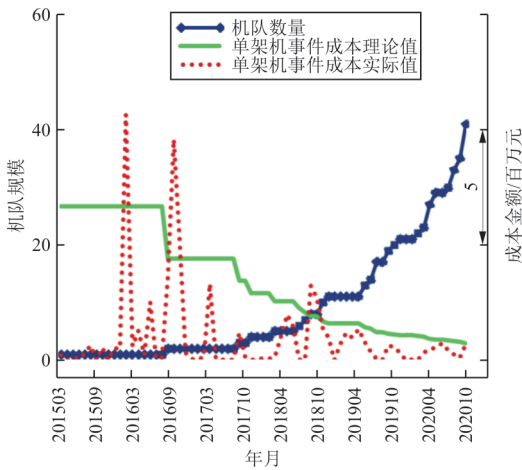


图3 某型民机单架机持续适航事件成本经验曲线  
Fig. 3 Cost experience curve of continuous airworthiness event of single aircraft

### 2.3.2 单架机实际成本曲线

根据收集的数据制作单架机持续适航事件实际值(机队平均值)曲线的同时,统计和整理单架机实际成本,并生成单架机实际成本曲线,比较有代表性的几架飞机的实际成本曲线。

首家客户首架机持续适航事件成本曲线如图4所示。

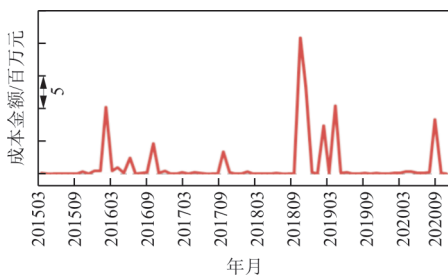


图4 首家客户首架机持续适航事件成本曲线  
Fig. 4 Cost curve of continuous airworthiness event of the first customer's first aircraft

首家客户第二架机持续适航事件成本曲线如图5所示。

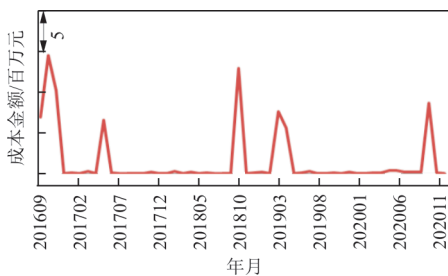


图5 首家客户第二架机持续适航事件成本曲线  
Fig. 5 Cost curve of continuous airworthiness event of the first customer's second aircraft

第二家客户首架机持续适航事件成本曲线如图6所示。

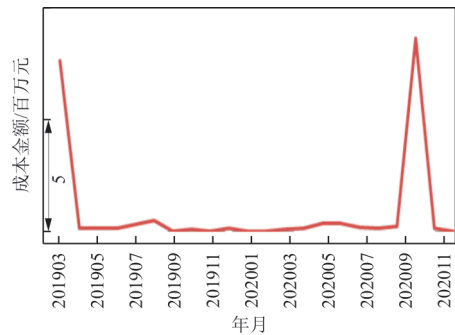


图6 第二家客户首架机持续适航事件成本曲线  
Fig. 6 Cost curve of continuous airworthiness event of the second customer's first aircraft

第四家客户第二架机持续适航事件成本曲线如图7所示。

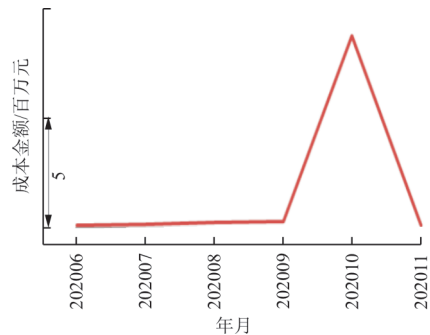


图7 第四家客户第二架机持续适航事件成本曲线  
Fig. 7 Cost curve of continuous airworthiness event of the fourth customer's first aircraft

### 2.3.3 数据分析

根据图3,单架机持续适航事件成本理论值为典型的经验曲线,单架机持续适航事件成本实际值(机队平均值)属于波动幅度较大的经验曲线,但随着客户数量和机队规模的不断扩大以及运行时间的增加,整体成本变化趋势是趋于平缓的,即成本曲线降低的速率是在持续减小的;成本的实际值(机队平均值)与理论值的变化趋势是基本相符合的。

根据图4~图7,一方面,持续适航事件成本曲线峰值是逐步降低的,从图4的超过第四条刻度线降低到到图7的接近第二条刻度线;另一方面,各个峰值所间隔的周期也在不断延长,从图4的接近3个月延长到图6的17个月。因此,从成本曲线峰值和间隔周期两方面来看,单架机持续适航事件

成本在逐步降低。

图4~图7的数据统计来源于3家不同航空公司的4架该型飞机,数据具有代表性和典型性,因此,由单架机持续适航事件成本的逐步降低可以推测机队持续适航事件成本(即单架机持续适航事件成本叠加的结果)的实际值(机队平均值)与理论值的变化趋势都是持续降低且两者基本相符合的结论是正确的。

## 2.4 机队持续适航事件成本预测模型

### 2.4.1 成本预测模型的提出

在建立的单架机持续适航事件成本曲线(机队平均值)公式的基础上,提出某型国产民用飞机成本预测模型,即:

$$C = x\eta y \quad (12)$$

式中: $C$ 为未来每年机队持续适航事件成本; $y$ 为单位成本,即单架飞机的持续适航事件成本金额,通过计算得到 $y = 26.65x^{-0.6}$ ; $\eta$ 为机队日可用率,取2021年平均值96.5%; $x$ 为积累产量,本文指机队规模。

某型飞机成本预测模型为

$$C = 25.72x^{0.4} \quad (13)$$

某型机2021年成本预测模型的结果曲线如图8所示。

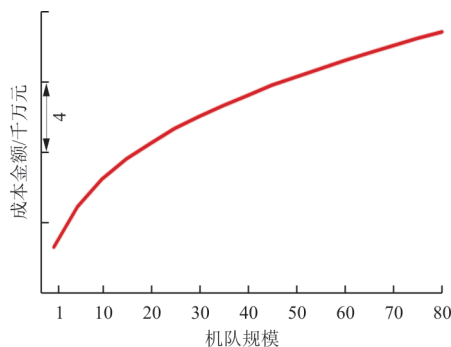


图8 某型机2021年成本预测模型的结果曲线

Fig. 8 Result curve of 2021 cost prediction model of a civil aircraft

### 2.4.2 成本预测模型的验证

截至2021年11月30日,以收集到的2021年持续适航事件产生的成本作为样本,验证所建立的模型是否正确,结果曲线如图9所示。在成本预测模型中赋值2021年实际成本的样本点,显示如

图9中三角点所示。

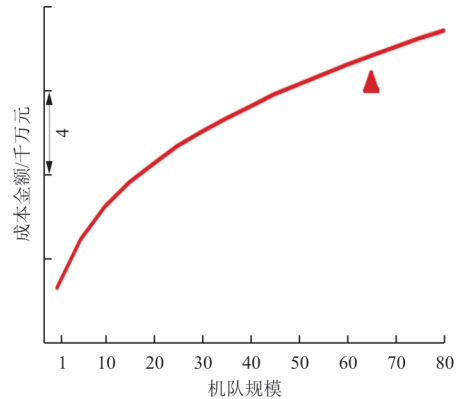


图9 某型机2021年实际成本成本赋值的结果曲线

Fig. 9 Result curve of actual cost assignment of a certain civil aircraft in 2021

从图9可以看出:2021年实际成本的赋值点接近于成本预测模型,此预测模型具有很高的可靠性和实用性。后续可以通过机队规模、机队日可用率以及每年的实际成本进行对比,不断迭代修正,令成本预测模型更为准确。

### 2.4.3 成本预测模型应用注意事项

在持续适航单个事件成本模型建立的过程中,部分数据的取值具有很高的敏感性,持续适航事件成本经验曲线的建立与机队持续适航事件成本预测模型的提出都是以持续适航单个事件成本模型为基础的,数据取值的偏差会影响成本预测模型准确度的偏离。

因此,持续适航事件和数据的收集应及时、准确。

## 2.5 经济性分析

### 2.5.1 成本预测模型结果曲线分析

图8中,成本预测模型结果曲线的斜率是在不断减小的,某型民用飞机每年的运行成本都符合经验曲线,使得机队的运行成本增长速率随着机队规模的扩大而减小。机队规模为1~20架,曲线的斜率变化明显,后续变化相对较小,即在机队规模增长的初期,运行的经验效果明显;后续效果趋缓,即持续适航事件成本下降的速率是在降低的,可以得到对成熟机队持续适航成本的预测分析。

## 2.5.2 原因分析

### (1) 运行经验的积累

某型民用飞机是我国自主研发的首款民用飞机,其开创了我国民用飞机从无到有的先河,其运营之初充满了压力和挑战:一方面,航空公司的飞行员、乘务员、维护人员对飞机的熟练度不足;另一方面,制造商的运行支持经验不足。这两方面的缺失,使得航空公司在这款飞机的运行之初信心不足,飞机的虚警、报故信息以及任何不在预期的反馈,都会引起航空公司和主制造商的过度处置,处置方式主要有原因分析、排故、风险评估、甚至停飞。

随着这款飞机客户数量和机队规模的不断扩大,主制造商增加了培训力度,航空公司对飞机熟练成熟度的提高以及主制造商运行支持经验的积累,不仅使得本航空公司飞机运行受益,而且惠及后续运行这款民用飞机的航空公司。

同时,运行经验的积累也为持续适航工作的系统化和规范化发展提供了丰富的数据和经验。

### (2) 技术成熟度的提高

这款民用飞机自投入运行后,航空公司的飞行员、乘务员和维护人员都给出了诸多优化和改进的建议;同时,在飞机的运行过程中,主制造商也持续开展设计复查,对持续适航中产生事件较多的系统和设计进行设计更改和优化。因此,自飞机交付之日起,这款飞机的设计优化工作一直在推进中。

例如,左右侧内襟翼支臂连接螺栓、缝翼齿条与滑轨的安装销子、航空器手提式灭火器使用替代哈龙的灭火器以及燃油通气系统火焰抑制器等,主制造商都通过持续适航体系制定了临时改正/改进措施,后续逐一进行了设计优化,并通过客户服务文件和适航指令对在役飞机进行整改和贯彻,从根本上杜绝了由于设计不合理带来的潜在风险。

另外,这款飞机采用了国际上通用的“主制造商—供应商”的设计模式,选用了大量国际先进供应商产品。随着供应商产品不断更新换代与优化,飞机也在逐步优化中。

设计优化的持续推进使得这款飞机更好地满

足客户的运行需求、不断提升市场评价的同时,也大幅降低了该型飞机的运行和维护成本。

### (3) 制造成熟度的改进

飞机交付运行后,也产生了部分因制造质量问题而报告的持续适航事件,例如:机身部分区域漏铆钉。类似事件经过持续适航体系的处置,通过发布客户服务文件和适航指令,对包括在役飞机的整个机队复查和整改,同时完善工艺文件以及质检要求,从根本上改进制造成熟度。

### (4) 技术出版物的持续修订

由于这款飞机是我国自主研发的首款民用飞机,主制造商不仅在飞机设计上缺乏经验,在飞机配套的技术出版物甚至是持续适航文件的编制上也同样没有经验可以借鉴。因此,交付给航空公司的技术出版物甚至是持续适航文件,存在错误或不准确、内容缺失、操作性差等缺陷。

随着飞机的运行,主制造商从航空公司的需求出发,对技术出版物和持续适航文件进行了持续的跟踪和修订,有助于航空公司对飞机的运行和维护。

### (5) 持续适航体系的逐步成熟

持续适航体系建设的规章依据包括《民用航空器产品和零部件合格审定规定》<sup>[19]</sup>和《民用航空器适航指令规定》<sup>[20]</sup>。

根据《型号合格证持有人持续适航体系的要求》<sup>[21]</sup>,型号合格证持有人在交付首架飞机之前,应按其要求建立持续适航体系。TC持有人必须编制经局方批准并满足要求的持续适航体系管理手册,说明体系的组成、程序、标准和方法。

随着某型飞机交付数量的不断增加,客户数量和机队规模不断扩大,从最初保障一家航空公司一架飞机的安全运行,到现在保障几家航空公司几十架飞机组成的机队的安全运行,局方、运营人/维修单位和型号合格证持有人的工作配合度越来越高,持续适航体系也在运行过程中得到修正和完善。

逐步完善的持续适航体系在避免事故的发生、提高航空器安全性和可靠性、改进航空器的设计、降低飞机持续适航事件成本等诸多方面都发

挥了不可替代的作用。

### (6) 运营阶段深入的影响

在飞机的运营早期,运行经验的积累、技术成熟度的提高、制造成熟度的改进、技术出版物的修订、持续适航体系的完善等,对于降低持续适航事件成本有显著的效果;随着运营阶段的深入,飞机各方面技术逐步优化,航空公司和主制造商的工作以及工作配合成熟度越来越高,持续适航事件成本的降低会逐步放缓。

## 3 结论

(1) 本文建立了持续适航事件成本结构,在此基础上,提出机队持续适航事件成本预测模型,实现了持续适航事件经济性分析。

(2) 在机队持续适航成本预测模型提出的过程中,飞机停机天数、事件接收到确定措施时间和措施实施时间的取值敏感度高,在后续机队的运行过程中,应尽量减小这三个参数的取值,以降低持续适航事件成本。

我国持续适航体系的运行仍然处于持续完善的阶段,希望通过本文工作可以助力持续适航体系的科学性和经济性发展。

### 参考文献

- [1] 中国民用航空局飞行标准司. 航空器的持续适航文件: AC-91-11[S]. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2018. Flight Standards Department of Civil Aviation Administration of China. Continuous airworthiness documents of aircraft: AC-91-11[S]. Beijing: Flight Standards Department of Civil Aviation Administration of China, 2018. (in Chinese)
- [2] DE FILIPPO F. Continued airworthiness and operation: airworthiness[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2011: 243-319.
- [3] 贾宝惠, 马语蔚, 王卓, 等. 基于TARAM的民用飞机结构类事件的持续运营安全评估[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 24-34, 49. JIA Baohui, MA Yuwei, WANG Zhuo, et al. Continuous operational safety assessment of civil aircraft structural events based on TARAM [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 24-34, 49. (in Chinese)
- [4] 王祥. 面向持续适航的民机系统安全性分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017. WANG Xiang. Research on technique of civil aircraft systems safety analysis faced to continuous airworthiness[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [5] 韩丽. 民机持续适航文件及计划维修要求研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 48(7): 89-93. HAN Li. Research on the continued airworthiness and schedule maintenance requirements for civil transport aircraft[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 48(7): 89-93. (in Chinese)
- [6] 陈勇. 民用飞机维修成本分析与评估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. CHEN Yong. Civil aviation maintenance cost analysis and evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [7] 王伟, 刘帅, 白杰. 航空发动机持续适航文件中的维修间隔研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(4): 88-92. WANG Wei, LIU Shuai, BAI Jie. Research on maintenance intervals in ICA of aeroengine[J]. Aeroengine, 2015, 41(4): 88-92. (in Chinese)
- [8] 林家冠, 陆军. 民机持续适航改正措施过程研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(8): 50-54. LIN Jiaguan, LU Jun. Research on the continuing airworthiness corrective action process for civil transport aircraft[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50(8): 50-54. (in Chinese)
- [9] 杨小丽. 技术经济视角下的持续适航管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. YANG Xiaoli. Research on studies in persistent airworthiness management from an angle of technical economy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [10] 王燕玲. 关于提高运营故障数据处理和利用效率的方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(3): 81-84. WANG Yanling. The method research of improve service efficiency about aircraft operation failure records[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(3): 81-84. (in Chinese)
- [11] SAE. Safety assessment of transport airplanes in commercial service: ARP-5150[S]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 2003.
- [12] FAA. System design and analysis [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1988.
- [13] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: ARP-4761[S]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [14] ICAO. Safety management manual (SMM) : Doc 9859 [S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013.
- [15] EASA. On acceptable means of compliance and guidance material for the airworthiness and environmental certification of aircraft and related products, parts and applications, as well as for the certification and production organizations[S]. Co-



- logne: European Aviation Safety Agency, 2012.
- [16] Air Transport Association of America. Information standards for aviation maintenance: ATA-2200 [S]. US: Air Transport Association of America, Inc., 2000.
- [17] HENDERSON B D. The experience curve reviewed III: why does it work? [EB/OL]. [2021-12-14]. www.bcg.com. 1974.
- [18] AEA. Short-medium range aircraft AEA requirements[S]. Bursse; AEA, 1989.
- [19] 中国民用航空局. 民用航空器产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017. Civil Aviation Administration of China. Provisions on certification of civil aircraft products and parts: CCAR-21-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2017. (in Chinese)
- [20] 中国民用航空局. 民用航空器适航指令规定: CCAR-39 [S]. 北京: 中国民用航空局, 1990. Civil Aviation Administration of China. Provisions of civil aircraft airworthiness directive: CCAR-39[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 1990. (in Chinese)
- [21] 中国民用航空局. 型号合格证持有人持续适航体系的要求: AC-21-AA-2013-19[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013. Civil Aviation Administration of China. Requirements for continuous airworthiness system of model certificate holder: AC-21-AA-2013-19[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2013. (in Chinese)

#### 作者简介:

王燕玲(1980—),女,硕士研究生,高级工程师。主要研究方向:航空工程。

宋文滨(1970—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞机设计,航空经济学,空气动力学及计算流体力学。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 49 页)

- [26] LILLICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [EB/OL]. [2022-01-13]. <https://arxiv.org/pdf/1509.02971.pdf>.
- [27] 董豪, 杨静, 李少波, 等. 基于深度强化学习的机器人运动控制研究进展[J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 278-292. DONG Hao, YANG Jing, LI Shaobo, et al. Research progress of robot motion control based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision Making, 2022, 37(2): 278-292. (in Chinese)
- [28] BERNER C, BROCKMAN G, CHAN B, et al. Dota 2 with large scale deep reinforcement learning [EB/OL]. [2022-01-13]. <https://arxiv.org/abs/1912.06680v1>.
- [29] YE D H, CHEN C B, ZHANG W, et al. Towards playing full MOBA games with deep reinforcement learning [EB/OL]. [2022-01-13]. <https://arxiv.org/abs/2011.12692>.
- [30] SCHULMAN J, LEVINE S, MORITZ P, et al. Trust region policy optimization[EB/OL]. [2022-01-13]. <https://arxiv.org/pdf/1502.05477.pdf>.
- [31] KINGMA D, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. [2022-01-13]. <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf>.
- [32] TOBIN J, FONG R, RAY A, et al. Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to real[C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE, 2017: 23-30.

#### 作者简介:

李俊圣(2000—),男,本科生。主要研究方向:机器学习与空战决策。

岳龙飞(1995—),男,博士研究生。主要研究方向:深度强化学习与空战智能决策。

左家亮(1986—),男,博士,副教授。主要研究方向:深度强化学习与空战智能决策。

俞利新(1980—),男,硕士,高级实验师。主要研究方向:作战规划与作战评估技术。

赵家乐(2000—),男,本科生。主要研究方向:机器学习与空战决策。

(编辑:丛艳娟)