

文章编号:1674-8190(2021)05-139-06

# 基于隐蔽故障和多失效模式耦合的应急门 安全性分析

朱铮铮,徐锦锦,丁鸿飞,韩昀

(上海飞机设计研究院 飞机结构强度工程技术所,上海 201210)

**摘要:**民用飞机翼上应急门具有特殊性,故障存在一定的隐蔽性,因此合理地分析其安全性尤为重要。本文明确应急门隐蔽故障的评估和选取方式,在底事件失效概率的求解过程中引入隐蔽故障暴露时间,建立应急门空中意外打开故障树;将常规构建的“公差累积导致门轴运动不到位”底事件考虑成由公差累积和结构磨损共同作用导致的门轴运动不到位问题,细化故障树底事件建模技术,开展安全性分析,并对故障树细化前后可靠性分析结果进行对比。结果表明:细化后的故障树更符合工程实际,应急门可靠性分析结果更准确。

**关键词:** 隐蔽故障;应急门;安全性;多失效模式;可靠性

中图分类号: V267

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.19

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Safety Analysis for the Civil Aircraft Emergency Door Based on Latent Failure and Multi-failure Mode Coupling

ZHU Zhengzheng, XU Jinjin, DING Hongfei, HAN Di

(Aircraft Structure and Stress Division, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The emergency door on the wing of a civil aircraft has particularity, and its fault is somewhat concealed, so it is particularly important to analyze its safety reasonably. The evaluation and selection principles of the latent failure of the emergency door are defined, and the exposure time of the latent failure is considered in the solution procedure of the failure probability of the bottom event. The fault tree of accidental opening of emergency door in flight is established. The bottom event of “the latch axis movement being not in place caused by tolerance accumulation”, which is generally constructed, is considered as the mechanism movement not being in place caused by the joint action of tolerance accumulation and structural wear. The modeling technology of fault tree bottom event is refined, and its safety is analyzed. The results of reliability analysis before and after fault tree refinement are compared. The results show that the refined fault tree is more in line with the engineering practice, and the reliability analysis result of emergency door is more accurate.

**Key words:** latent failure; emergency door; safety; multi-failure mode; reliability

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-10-12

通信作者: 朱铮铮, nwpu2015zhu@163.com

引用格式: 朱铮铮, 徐锦锦, 丁鸿飞, 等. 基于隐蔽故障和多失效模式耦合的应急门安全性分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 139-144.

ZHU Zhengzheng, XU Jinjin, DING Hongfei, et al. Safety analysis for the civil aircraft emergency door based on latent failure and multi-failure mode coupling[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 139-144. (in Chinese)

## 0 引言

舱门作为飞机的关键组成部分,中国民用航空局运输类飞机适航标准 CCAR-25-R4 783 条款<sup>[1]</sup>对其安全性有着明确的要求。此外,舱门作为飞机应急着陆后人员撤离的主要逃生出口,803 条款要求 44 座以上飞机须通过符合标准要求的应急撤离演示试验来表明其满载乘员能在试验开始后的 90 s 内从原位置撤离至地面<sup>[2]</sup>。因此,舱门作为人员正常进出及应急撤离时的出口,其安全性问题显得十分重要。然而,应急门有别于登机门、服务门和货舱门,它属于常闭舱门(通常情况下不开启,仅在维修检查和应急撤离时才被打开),导致该门的故障存在一定的隐蔽性,由于应急门的特殊性,合理地分析其安全性显得尤为重要。

目前,一些研究者从舱门机构的仿真、可靠性和安全性等方面开展了相应研究。例如:许清清<sup>[3]</sup>在 Adams 中建立了应急门虚拟样机模型,对其运动机构进行了仿真分析;魏涛等<sup>[4]</sup>将应急门锁机构拉杆长度、助力弹簧刚度系数和连杆销钉直径处理为随机变量,采用四阶矩法进行锁机构卡滞可靠性灵敏度分析;冯蕴雯等<sup>[5]</sup>以民用飞机舱门全寿命周期的安全使用为目标,提出了民用飞机舱门机构功能安全性分析方法,且构建了登机门空中意外故障树;秦强<sup>[6]</sup>提出了舱门安全性分析的具体步骤与流程,开展了基于过中心锁定原理的货舱门典型锁定机构可靠性分析研究,且建立了货舱门空中偶然打开故障树;贾洁羽等<sup>[7]</sup>基于 BP 神经网络法和重要抽要法,探究了飞机舱门锁机构关闭系统的可靠性问题;Zhang Chunyi 等<sup>[8]</sup>针对多构件多失效模式系统可靠性分析中计算效率和计算精度较差的问题,采用多重极值响应面法开展了相应的可靠性分析研究;井惠林等<sup>[9]</sup>在 Adams 中建立了舱门机构的磨损模型,开展了舱门机构磨损情况下可靠性分析;孙中超等<sup>[10]</sup>开展了考虑运动副磨损情况下某锁机构的可靠性演化规律研究,提出了针对机构可靠性演化问题的 Monte Carlo 方法;P. Flores 等<sup>[11]</sup>、M. Saad 等<sup>[12]</sup>针对含间隙连杆机构的运动精度问题,开展了相应的可靠性分析。从现有研究可知,在舱门安全性分析中没有考虑结构隐蔽故障这一分析理念,未考虑多失效模式耦合的机构功能丧失。

本文以某型民用飞机应急门为研究对象,考

虑故障模式的隐蔽失效,建立应急门空中意外打开故障树,细化门机构运动不到位的故障模式,建立细化后的可靠性分析模型,对可靠性分析结果进行对比。

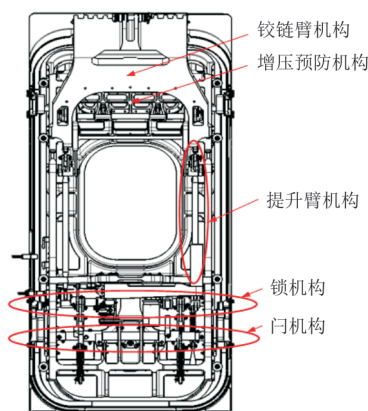
## 1 应急门安全性分析故障树

### 1.1 应急门结构形式

某型民用飞机应急门位于飞机翼上两侧,具体分布如图 1(a)所示,应急门为了实现其相应的功能,主要由门机构、锁机构、提升臂机构、增压预防机构和铰链臂机构等组成,其结构简图如图 1(b)所示。



(a) 右侧应急门分布(左侧对称布置)



(b) 应急门简图

图 1 某型民用飞机应急门

Fig. 1 Emergency door of civil aircraft

### 1.2 应急门空中意外打开故障树

通过对舱门相关适航条款的解读可知,应急门的主要功能包含:锁定、指示、关闭、打开、密封和增压预防。其中“应急门空中意外打开”是指非

指令性的打开舱门,是由意外情况导致的打开,从事故统计可知,若在空中意外打开舱门则会导致灾难性故障发生<sup>[13]</sup>。根据SAE ARP 4761<sup>[14]</sup>中对失效状态影响等级的划分,在空中应急门意外打开将会导致灾难性事故,其影响等级为I类,安全

性指标要求为小于 $1 \times e^{-9}/fh$ 。基于应急门的工作原理,结合文献[5]中登机门和文献[6]货舱门空中意外打开案例逻辑,绘制出应急门空中意外打开故障树,如图2所示(因篇幅限制,故障树中转移符号A和B下的底事件未展开)。

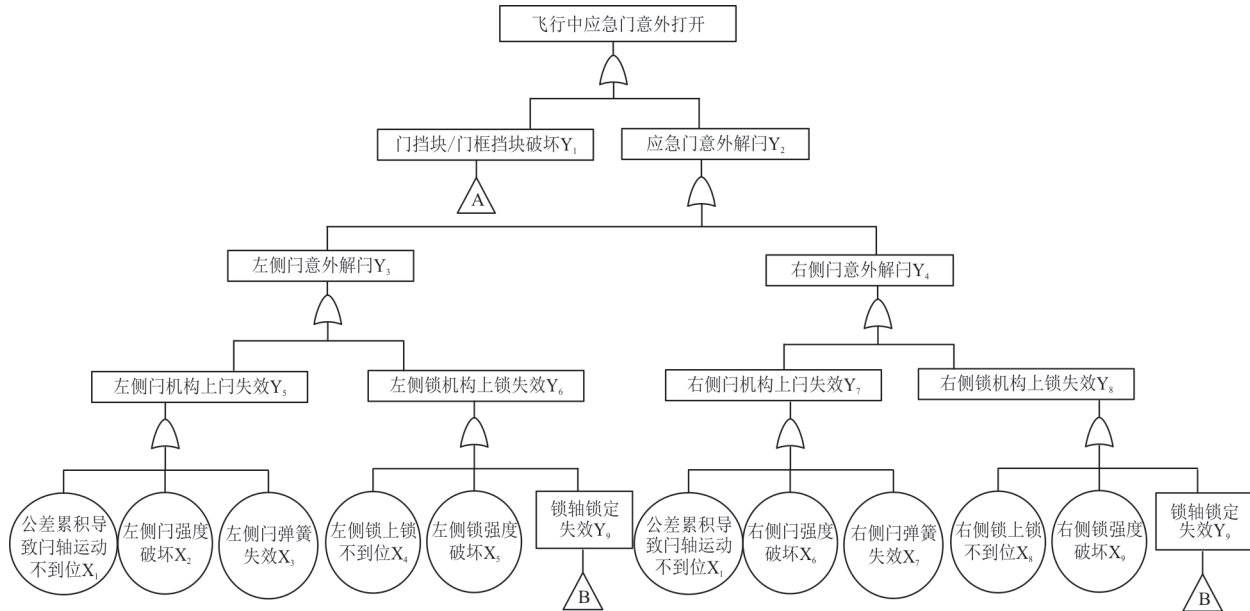


图2 应急门空中意外打开故障树

Fig. 2 FTA of accidental opening of emergency door in flight

从图2可以看出:故障树底事件概率分析涉及的模型主要包括结构/机构静强度可靠性分析、机构运动精度可靠性分析、弹簧疲劳可靠性分析模型等,其中电子产品的故障率由供应商提供。

## 2 考虑隐蔽故障的应急门安全性分析

### 2.1 应急门结构/机构隐蔽故障的判断原则

民用飞机舱门包含登机门、服务门、应急门和货舱门等,由于登机门、服务门和货舱门均属于经常开启和关闭的舱门,当舱门发生故障后,很容易被空乘人员发现,并可立刻开展排故和维修工作,因此在对上述舱门开展安全性分析时,故障的风险暴露时间一般为一个飞行循环,也称为“显性故障”。但是在飞机运营过程中,应急门属于常闭状态,当应急门结构/机构发生故障或者失效后,并不能第一时间被空乘人员或机务人员发现,从持续运营安全的角度出发,应确定故障暴露时间以限制飞机的运行时间并纠正隐蔽故障<sup>[15]</sup>。换言

之,在开展应急门安全性分析时,其结构/机构风险暴露时间不能再按照常规的每飞行循环(即3 fh)处理,而是需要考虑故障的隐蔽性,即将其考虑成“隐蔽故障”。

为了确定本文应急门结构/机构故障的风险暴露时间,需明确该机型的不同检修周期。目前,飞机的检修间隔分为A检、B检和C检,其中很多航空公司取消了B检,或者说已将B检的工作向A检、C检逼近。

A检:目视检查飞机外部、内部和驾驶舱缺陷,目视检查客舱显露项目并加上系统的例行保养<sup>[15]</sup>,一般在飞机投入运营两年内达到航线级维修间隔。

C检:彻底对飞机内部、外部、驾驶舱和发动机做目视检查,且需要打开检修口盖,彻底清洗、润滑和防腐,进行应急系统的测试,并对影响飞行安全的主要电子和机械系统进行检查<sup>[16]</sup>,即俗称的基地级维修。

本文研究对象的A检间隔为700 fh,C检间隔为7 000 fh。基于研究对象的特点及其航空公司的

运营维修情况,该应急门的检修周期与飞机的C检间隔相同,即应急门隐蔽故障的暴露时间为7 000 fh。

由系统可靠性设计与分析<sup>[17]</sup>理论可知,根据舱门结构/机构故障是否为隐蔽失效,给出结构失效概率与暴露时间、失效率之间的关系。

(1) 若故障为非隐蔽失效时,采用指数分布的形式进行失效概率的计算,其失效概率的求解如式(1)所示。

$$P_f = 1 - e^{-\lambda \cdot T} \quad (1)$$

式中: $P_f$ 为失效概率; $T$ 为风险暴露时间(即连续两次检修的时间间隔); $\lambda$ 为故障率。

(2) 若故障为隐蔽失效时,需考虑结构周期性的检修时间间隔,其失效概率的求解如式(2)所示。

$$P_f = \lambda \cdot T \quad (2)$$

## 2.2 细化应急门空中意外打开故障树底事件

基于文献[5]和文献[6]对民用飞机登机门和货舱门空中意外打开故障树中机构运动不到位的方法发现,针对“民用飞机舱门机构运动不到位”问题,主要考虑结构制造公差累积导致机构输出角度未能达到预期。结合工程实际问题,仅考虑结构制造公差累积导致的机构运动不到位不能真实反映应急门的安全性问题,因此,有必要开展更深入的研究。本文将舱门安全性分析中常规构建的“公差累积导致门轴运动不到位”底事件 $X_1$ 调整为中间事件 $Y_{10}$ “门轴运动不到位”,并将其细化成“公差累积导致门轴运动不到位 $X_1$ ”和“分时机构磨损导致门轴运动不到位 $X_{10}$ ”,即考虑多种失效模式对门轴运动不到位的影响,细化后事件间的逻辑关系如图3所示。

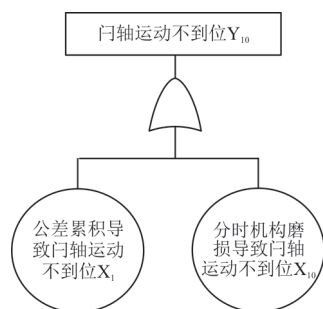


图3 门机构运动不到位

Fig. 3 Latch mechanism inadequate movement

应急门门轴运动原理为:通过机构的传递作用,首先让应急门手柄的运动传递到锁轴,随后通过锁轴上的凸轮机构与门轴分时机构接触,进而带动门轴的联动。新增底事件 $X_{10}$ 的运动过程如图4所示。

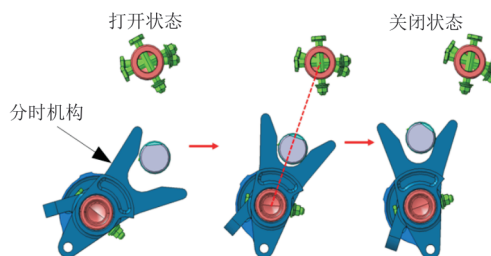


图4 分时机构运动状态

Fig. 4 Motion state of time-sharing mechanism

针对“分时机构磨损导致门轴运动不到位 $X_{10}$ ”,主要考虑凸轮与分时机构间的滚动摩擦接触导致的分时机构磨损,进而引起门轴运动不到位。当容许磨损量 $W^*$ 大于实际磨损量 $W$ 时,摩擦副处于磨损安全状态;反之,摩擦副处于失效状态。因此,结构磨损失效的安全边界方程如式(3)所示。

$$M_w = W^* - W \quad (3)$$

从而可通过相应的可靠性分析方法计算出机构磨损失效的可靠性指标 $\beta$ 。

$$\beta = \frac{W^* - W}{\sqrt{C_{w^*}^2 W^{*2} + C_w^2 W^2}} \quad (4)$$

式中: $C_{w^*}$ 为容许磨损量变异系数; $C_w$ 为实际磨损量变异系数。

再根据正态分布计算公式可得出对应的失效概率,其表达式如式(5)所示。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

基于型号工程经验及数据,分时机构磨损可靠性模型中相关参数如表1所示。

表1 磨损可靠性分析参数

Table 1 The parameters of wear reliability analysis

参数	数值	参数	数值
$C_{w^*}$	0.08	$W/\text{mm}$	0.23
$C_w$	0.10	$W^*/\text{mm}$	0.50

## 2.3 可靠性分析结果

故障树中的强度可靠性分析模型输入为结构的安全裕度,弹簧疲劳可靠性分析的输入为弹簧



的物理参数、载荷循环数等。鉴于篇幅限制,未将所有底事件失效概率一一列举。门机构运动不到位底事件细化前后的可靠性分析结果对比如表2所示。得到细化前后应急门空中意外打开的概率分别为 $2.80 \times e^{-11}$ 和 $1.17 \times e^{-10}$ 。

表2 失效概率对比  
Table 2 Comparison of failure probability

事件名称	细化前可靠性分析结果		细化后可靠性分析结果	
	失效概率	暴露时间/h	失效概率	暴露时间/h
公差累积导致的门轴运动不到位 $X_1$	$7.2 \times e^{-16}$	3	$1.68 \times e^{-12}$	7 000
分时机构磨损导致门轴运动不到位 $X_{10}$	—	—	$7.3 \times e^{-10}$	7 000

从表2可以看出:(1)当应急门底事件故障的风险暴露时间不再按常规的一个飞行循环处理,而是考虑结构的隐蔽故障,此时底事件“公差累积导致的门轴运动不到位”的失效概率出现了量级上的增大;(2)细化故障树底事件后,应急门空中意外打开顶事件的概率为 $1.17 \times e^{-10}$ ,故障树顶事件的失效概率变大,通常舱门结构/机构的安全裕度较大,故结构出现强度破坏的概率相对较小,反而是制造公差累积、机构磨损等原因导致舱门结构/机构运动不到位的案例更多,即失效概率更大,这一结果与舱门实际使用情况相符。

### 3 结 论

(1)结合民用飞机应急门的使用特点,在对应应急门结构/机构开展安全性分析时,底事件失效概率的求解不能按常规的一个飞行循环处理,需根据应急门的检修间隔确定故障的风险暴露时间,即需考虑底事件故障发生的隐蔽性。

(2)将舱门中常规构建的“公差累积导致的门机构运动不到位”底事件考虑成由公差累积和结构间磨损共同作用导致的机构运动不到位问题,细化了应急门门机构运动不到位的故障模式,细化后的可靠性分析模型更符合工程实际。

(3)对比了“应急门空中意外打开”故障树底事件细化前后的可靠性分析结果,细化后的顶事件失效概率更高。

#### 参考文献

[1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4

[S]. 北京: 中国民用航空局, 2001.

Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards of transport category aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2001. (in Chinese)

[2] 彭浩轩, 刘小川, 白春玉, 等. 民机应急撤离实验与仿真研究进展[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 759-766.

PENG Haoxuan, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, et al. Advances in experiment and simulation of civil aircraft emergency evacuation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 759-766. (in Chinese)

[3] 许清清. 大型客机应急门运动机构仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

XU Qingqing. Research on simulation technique of aircraft emergency door motion mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[4] 魏涛, 苟文选, 唐松, 等. 水上应急门开锁机构手柄力分析与卡滞可靠性研究[J]. 西安工业大学学报, 2017, 37(10): 730-735.

WEI Tao, GOU Wenxuan, TANG Song, et al. Handle force and stuck reliability of the aircraft water emergency door [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2017, 37(10): 730-735. (in Chinese)

[5] 冯蕴雯, 姚雄华, 薛小锋, 等. 民机舱门安全性分析方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(5): 803-809.

FENG Yunwen, YAO Xionghua, XUE Xiaofeng, et al. An effective safety analysis method of civil aircraft cabin door [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(5): 803-809. (in Chinese)

[6] 秦强. 民机舱门安全性与可靠性分析研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.

QIN Qiang. Safety and reliability analysis for the doors of civil aircraft[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)

[7] 贾洁羽, 崔卫民, 张玉刚, 等. 飞机舱门锁机构多失效模式可靠性分析方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 524-531.

JIA Jieyu, CUI Weimin, ZHANG Yugang, et al. Reliability analysis method of aircraft hatch lock mechanism with multi-failure modes [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 524-531. (in Chinese)

[8] ZHANG Chunyi, LU Cheng, FEI Chengwei, et al. Dynamic probabilistic design technique for multi-component system with multi-failure modes [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(11): 2688-2700.

[9] 井慧林, 赵海龙, 王铁军. 考虑铰链磨损时飞机舱门运动精度可靠性研究[J]. 机械设计, 2011, 28(4): 55-59.

JING Huilin, ZHAO Hailong, WANG Tiejun. Investigation of aircraft hatch door motion accuracy reliability considering hinges abrasion [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(4): 55-59. (in Chinese)

[10] 孙中超, 喻天翔, 崔卫民, 等. 铰链间隙对连杆机构运动精

- 度的重要性测度分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(21): 2874-2879.
- SUN Zhongchao, YU Tianxiang, CUI Weimin, et al. Importance measure of revolute joint clearance about motion accuracy of linkage mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(21): 2874-2879. (in Chinese)
- [11] FLORES P, AMBROSIO J. Revolute joint with clearance in multibody systems[J]. Computers & Structures, 2004, 82(17): 1359-1369.
- [12] SAAD M, NAM H K, NATHAN A, et al. Analysis of planar multi-body systems with revolute joint wear[J]. Wear, 2010, 268(5): 643-652.
- [13] 姜翰林. 民用飞机舱门事故统计分析[J]. 科技致富向导, 2013(12): 144.
- JIANG Hanlin. Statistical analysis of civil aircraft door accidents[J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2013(12): 144. (in Chinese)
- [14] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: ARP 4761[S]. US: SAE, 1996.
- [15] 郭博智, 阮宏泽, 刘会星. 飞机系统安全性—初始适航合格审定评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019: 302-304.
- GUO Bozhi, RUAN Hongze, LIU Huixing. Aircraft system safety assessments for initial airworthiness certification [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019: 302-304. (in Chinese)
- [16] 上官雪民. 航班计划的模拟与优化研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- SHANGGUAN Xuemin. Flight schedule simulation and optimization[D]. Shanghai: Fudan University, 2008. (in Chinese)
- [17] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- SONG Baowei. System reliability design and analysis[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013. (in Chinese)

#### 作者简介:

朱铮铮(1987—),男,博士,工程师。主要研究方向:飞机舱门机构可靠性分析及结构设计。

徐锦锦(1990—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机舱门安全性分析及动力学仿真。

丁鸿飞(1993—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机舱门结构/机构设计。

韩 颀(1993—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机舱门结构/机构设计。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 115 页)

- [10] WANG L R, LI S R, DENG X L. Study about controlling of procurement cost of construction material [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 389: 1062-1064.
- [11] 沈小静. 采购供应链管理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
- SHEN Xiaojing. Procurement and supply management[M]. Beijing: Peking University Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 岳天佐. S公司航材采购成本控制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- YUE Tianzuo. The research of procurement cost control management for aircraft materials in Company S [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [13] 周欣韵. W公司航材营销策略分析[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- ZHOU Xinyun. Analysis on aviation material marketing strategy of W Company [D]. Shanghai: Donghua University, 2020. (in Chinese)
- [14] ROBIN C, REGINE S. Interorganizational cost management in network relationships [J]. International Journal of Production Economics, 2002, 79(1): 33-38.
- [15] 林乔. 我国民航业航材共享成本管理研究——以中航材有限公司为例[D]. 广州: 广东外语外贸大学, 2019.
- LIN Qiao. Research on cost management of aviation material pooling in China's civil aviation industry: take China Aviation Supplies Co., Ltd. as example [D]. Guangzhou: Guangdong University of Foreign Studies, 2019. (in Chinese)
- [16] 冯蕴雯, 陈俊宇, 刘佳奇, 等. 民用飞机航材预测与配置管理技术综述[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 443-453.
- FENG Yunwen, CHEN Junyu, LIU Jiaqi, et al. Review on the civil aircraft spare parts prediction and configuration management technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 443-453. (in Chinese)

#### 作者简介:

李波波(1990—),男,学士,工程师。主要研究方向:民用飞机航材支援体系、航材需求预测、航材价格体系。

姜 婷(1981—),女,学士,工程师。主要研究方向:民用飞机航材价格、航材可靠性。

王秋男(1992—),女,学士,工程师。主要研究方向:民用飞机航材预测与配置管理。

李一丹(1990—),女,学士,助理工程师。主要研究方向:民用飞机航材支援、航材适航性。

(编辑:丛艳娟)