

文章编号:1674-8190(2021)05-145-07

# 水陆两栖飞机涉水结构修理级别分析研究

田晶<sup>1</sup>,马小骏<sup>2</sup>,冯蕴雯<sup>1</sup>,胡宇强<sup>3</sup>,李阳<sup>3</sup>

(1.西北工业大学 航空学院,西安 710072)

(2.中国商用飞机有限责任公司 科技委,上海 200241)

(3.中航通飞华南飞机工业有限公司 市场客服中心,珠海 519000)

**摘要:**修理级别分析(LORA)是水陆两栖飞机涉水结构维修工程分析的一个重要内容。国内外修理级别分析主要针对民用飞机、舰载机、车辆、船舶等,有关水陆两栖飞机涉水结构修理级别分析的研究较少,基于此,针对水陆两栖飞机涉水结构LORA的流程和模型进行研究。建立涉水结构三级修理模式,提出涉水结构的LORA流程;建立适用于涉水结构三级修理的经济性LORA(ELORA)模型,给出ELORA需要考虑的成本因素;以水陆两栖飞机涉水舱门上的接近开关为例进行经济性修理级别分析。结果表明:待分析产品应在中继级进行修理,与工程实际中的修理级别一致,本文ELORA模型应用于涉水结构具有可行性。

**关键词:**水陆两栖飞机;涉水结构;维修工程分析;修理级别分析

中图分类号:V267

文献标识码:A

DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.20

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Level of Repair Analysis for Amphibious Aircraft Wading Structure

TIAN Jing<sup>1</sup>, MA Xiaojun<sup>2</sup>, FENG Yunwen<sup>1</sup>, HU Yuqiang<sup>3</sup>, LI Yang<sup>3</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Science and Technology Commission, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200241, China)

(3. Customer Service Center, AVIC Tongfei South China Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Level of repair analysis (LORA) is an important part of maintenance engineering analysis for amphibious aircraft wading structure. There are many studies mainly focusing on LORA of civil aircraft, shipboard aircraft, vehicles, ships and so on in the domestic and overseas, while studies on LORA of amphibious aircraft wading structure are few. Based on this, the process and method of LORA for the wading structure of amphibious aircraft are studied in this paper. A three-level repair model of the wading structure is established, and the LORA process of the wading structure is proposed. An economical LORA (ELORA) model for three-level repair of wading structure is established, and the cost factors to be considered for ELORA are given. The approach switch on the wading cabin door of an amphibious aircraft is taken as an example to carry out ELORA. The results show that the approach switch should be repaired in intermediate-level depot, which is in accordance with reality, and the ELORA model used on wading structure is feasible.

**Key words:** amphibious aircraft; wading structure; maintenance engineering analysis; level of repair analysis

收稿日期:2021-07-01; 修回日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金(51875465); 工信部民机专项科研项目(MJ-2018-G-55)

通信作者:冯蕴雯, fengyunwen@nwpu.edu.cn

引用格式:田晶,马小骏,冯蕴雯,等.水陆两栖飞机涉水结构修理级别分析研究[J].航空工程进展,2021,12(5):145-151.

TIAN Jing, MA Xiaojun, FENG Yunwen, et al. Study on level of repair analysis for amphibious aircraft wading structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 145-151. (in Chinese)

## 0 引言

修理级别分析(Level of Repair Analysis, 简称 LORA)是飞机维修工程分析的重要环节,维修工程分析中的计划维修分析(Scheduled Maintenance Analysis, 简称 SMA)产生的预防性维修任务,以及后勤保障分析相关的故障模式与影响分析(Logistics Support Analysis Related Failure Modes and Effects Analysis, 简称 LSA FMEA)、损伤与特殊事件分析(Damage and Special Events Analysis, 简称 DSEA)产生的纠正性维修任务,都要通过 LORA 来决定其是否需要维修、在哪修。

LORA 最早由美国国防部提出<sup>[1]</sup>,1993 年美国军方颁布军用标准 MIL-STD-1390D<sup>[2]</sup>,该标准给出了系统 LORA 的任务描述、具体内容等。国外研究者对 LORA 模型建立、算法求解及应用进行了大量研究,L. Barros 等<sup>[3]</sup>提出了考虑标准生命周期费用函数的修理级别优化方法,并开发了相关软件包;G. Gutin 等<sup>[4]</sup>证明 LORA 问题是多项式可解的;B. Taoufik 等<sup>[5]</sup>提出用基于禁忌搜索的混合遗传算法解决大规模决策变量问题,并以 H. Saranga 等<sup>[6]</sup>给出的算例进行求解;S. Thyagarajan 等<sup>[7]</sup>提出了适用于飞机复合材料结构修复决策过程的决策模型;M. R. Rawat 等<sup>[8]</sup>提出机队系统可靠性设计和 LORA 的联合优化方法,并采用基于蒙特卡洛仿真的遗传算法进行求解。我国研究者对 LORA 的研究开始较晚,吴昊等<sup>[9]</sup>提出了适用于民用飞机的三层三级经济性 LORA 模型,并用免疫粒子群法对模型求解;薛陶等<sup>[10]</sup>提出了适用于通用多层多级 LORA 经济性模型的 LORA 决策流概念;贾宝惠等<sup>[11-12]</sup>研究了针对民用飞机的经济性 LORA 模型和综合 LORA 模型;张帅等<sup>[13]</sup>、李季颖等<sup>[14]</sup>针对舰载机和舰载航空设备,分别建立了基于备件短缺数和模糊层次分析法多因素的 LORA 模型;王旭<sup>[15]</sup>、赵大磊等<sup>[16]</sup>对导弹弹体设备的 LORA 进行了研究;何春雨等<sup>[17]</sup>基于 LINGO 软件,开展了舰船装备 LORA 优化分析;饶若曦等<sup>[18]</sup>、李慧梅等<sup>[19]</sup>针对车辆装备,分别建立了基于综合权重确定的非经济性 LORA 模型和基于最小费用流的经济性 LORA 模型。当前国内外的 LORA 主要针对民用飞机、舰载机、船舶、导弹、车辆等,尚没有针对水陆两栖飞机的 LORA 研究。水陆两栖飞机在我国主要用于森林灭火和海上救援。随着国产

大型水陆两栖飞机 AG600 的成功首飞,研究水陆两栖飞机涉水结构的 LORA 成了迫切需求。

本文结合水陆两栖飞机初始运营阶段特点,提出适用于水陆两栖飞机涉水结构的 LORA 流程、ELORA 模型,并利用算例对经济性修理级别分析进行验证。

## 1 水陆两栖飞机涉水结构修理级别划分

水陆两栖飞机森林灭火和海上救援的任务模式决定了其民用飞机的属性,我国民用飞机现在多采用两级修理,但由于我国缺乏大型水陆两栖飞机的运营经验,水陆两栖飞机维修保障体系发展尚不成熟,两级修理并不能满足其维修保障要求。且在水陆两栖飞机运营初期,基地级维修位于珠海,而我国森林火灾多发地位于黑龙江、云南、甘肃等,采用两级修理模式会因为运输能力有限等影响飞机出勤率。基于以上两点因素,对水陆两栖飞机涉水结构采用三级修理模式:基层级、中继级和基地级。

### 1.1 基层级

基层级的实施条件为机场停机坪或停机库。主要工作包括:

(1) 完成飞机航前的预先准备工作和起飞前检查工作、航后的检查维护工作。

(2) 日常维护保养,非计划的排故维修,故障诊断隔离,进行故障航线可更换单元(Line Replaceable Unit, 简称 LRU)的更换。

(3) 将故障 LRU 送中继级、基地级或返厂检修。

此外,涉水结构长期处于高湿、高盐的环境中,在基层级需进行大量防腐蚀维护工作<sup>[20-22]</sup>;执行任务后,及时用清水清洗飞机表面,并用干燥的热风吹干,及时清除表面的盐分和油污等;日常维护时,尽量不要破坏零件涂层,发现涂层破坏或有疑似腐蚀时,及时修理防护;排水、防潮、通风;涂层体系的保养,若涂层已遭破坏,应及时进行修复或喷涂脱水防锈剂作暂时性保护;密封材料若因自然老化、高压冲洗等原因遭到破坏,要及时进行更换和填充;在外场腐蚀防护中,要定期检查活动接头、摩擦表面、轴承和操纵钢索等的润滑油脂是否充分。特别是飞机冲洗后,注意这些部位的再

润滑问题,油箱微生物沉积的预防与去除工作等。

### 1.2 中继级

中继级的实施条件为在指定的有 CCAR-145 部维修资质的修理厂或航空维修公司车间/厂房内<sup>[23]</sup>。主要修理工作包括:

- (1) 可兼顾完成基层级所有工作。
- (2) 完成将故障隔离到内场可更换单元 (Shop Replaceable Unit, 简称 SRU) 的诊断、检测工作。
- (3) 完成故障 SRU 的更换。
- (4) 将故障 SRU 送基地级或返厂维修。
- (5) 故障 LRU 的修复、测试、检验。
- (6) 将修好的 LRU 送基层级装机或作备件。

### 1.3 基地级

基地级的实施条件为在飞机制造(总装)厂或有 CCAR-145 部维修资质的飞机大修厂/航空维修公司车间/厂房内。基层级修理的主要工作包括:

- (1) 可兼顾完成基层级、中继级所有工作。
- (2) 完成飞机、发动机和主要机载设备翻修期的工作,以及 SRU 的修复与检测。

## 2 水陆两栖飞机涉水结构 LORA

### 2.1 LORA 流程

水陆两栖飞机涉水结构 LORA 流程如图 1 所示。

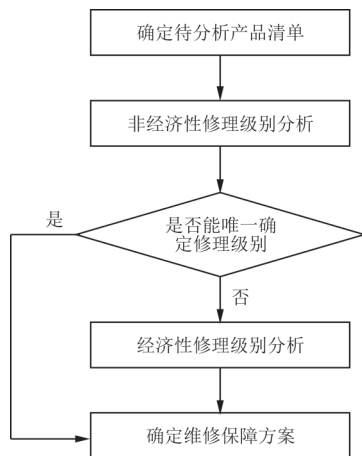


图 1 水陆两栖飞机涉水结构 LORA 流程图  
Fig. 1 Amphibious aircraft wading structure LORA flow chart

### (1) 确定待分析产品清单

在确定待分析产品清单时,需要将水陆两栖飞机涉水结构按功能划分为分系统、部组件、零件。其中分系统的故障是由部组件的故障引起,部组件的故障由零件引起。对涉水结构的划分如图 2 所示。

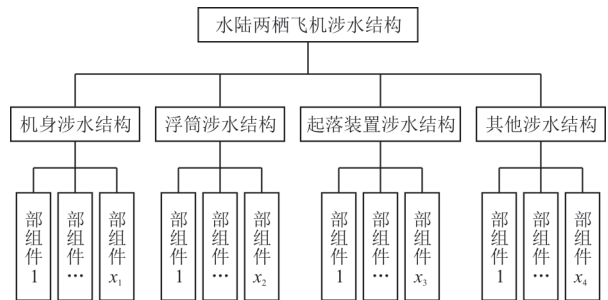


图 2 水陆两栖飞机涉水结构组成及修理层次划分  
Fig. 2 Composition of amphibious aircraft wading structure and classification of repair levels

划分好的涉水结构分系统、部组件、零件均为 LORA 待分析产品。其中,不可修复或可消耗的零件(如螺母,螺栓或垫圈)不会增加分析的价值,因此不包括在内。

### (2) 非经济性 LORA

在进行 LORA 时,首先对涉水结构待分析产品进行非经济性 LORA,非经济性 LORA 考虑以下六个因素:法规、战备完好性和任务成功性、维修设施、装卸与运输、保障设备、人力和人员,对涉水结构的每个待分析产品,用以上非经济性因素进行逻辑决断,确定初步修理方案。进行逻辑决断时应尽量结合 LSA FMECA 方面已有的工作成果。对于较简单的预防性维修工作,如保养、日常检测、腐蚀防护等都是基层级完成的。当非经济性分析不能确定唯一修理级别时,必须再进一步通过 ELORA 确定修理选项。

### 2.2 ELORA

对不能从非经济性分析判断修理级别的产品,需继续进行 LORA 判断最佳修理级别。在进行涉水结构 ELORA 时,对每个待分析产品,需先收集经济性分析数据,将其作为输入量代入 ELORA 模型,从而计算得出修理选项结果。

#### 2.2.1 ELORA 费用数据

涉水结构 ELORA 费用数据包含七大类:备件费用、设施费用、人员费用、资料费用、材料费用、

保障设备费用、送修产品的运输与包装费用。七 大类费用计算公式及其输入量说明如表 1 所示。

表 1 涉水结构 ELORA 数据输入表  
Table 1 ELORA input data table for wading structure

费用类型	费用计算	代号	代号说明
备件费用	$C_{SP} = N_0(P_S + P_W P_{C(\text{备件})} W_{\text{备件}} + S_W S_{C(\text{备件})} V_{\text{备件}})$	$N_{00}, N_{01}, N_{0D}$	备件在基层级、中继级、基地级的初始库存量
		$P_S$	备件单价
		$P_W$	单位千克、单位千米的运输与包装费用
		$P_{C(\text{备件})}$	备件运输与包装加权系数
		$W_{\text{备件}}$	备件的质量
		$D_{\text{购买地到基层级}}$	备件购买地到基层级场地的平均距离
		$D_{\text{购买地到中继级}}$	备件购买地到中继级场地的平均距离
		$D_{\text{购买地到基地级}}$	备件购买地到基地级场地的平均距离
		$S_W$	仓库年均库存费用
		$S_C$	备件库存级别加权系数
$V_{\text{备件}}$	备件所占的库存空间		
设施费用	$C_F = C_{YF} R_{uf}$	$C_{YF-O}$	基层级上所有场地设施的年维持费用
		$C_{YF-I}$	中继级上所有场地设施的年维持费用
		$C_{YF-D}$	基地级上所有场地设施的年维持费用
人员费用	$C_P = \left[ F_y t_{EMH-I} / t_{EMP-I} \right] \times (C_{YP-I} + C_A + C_{YT-I})$	$R_{ufO}, R_{ufI}, R_{ufD}$	各修理级别修理产品时对设施的利用率
		$t_{EMP-I}, t_{EMP-D}$	中继级、基地级年均工作时间/人
		$t_{EMH-I}, t_{EMH-D}$	产品在中继级、基地级修理时所需要的单人时间
		$F_y$	产品的年故障数
		$C_{YP-O}, C_{YP-I}, C_{YP-D}$	基层级、中继级、基地级修理产品分别所需人员年工资/人
		$C_{YT-O}, C_{YT-I}, C_{YT-D}$	基层级、中继级、基地级修理产品分别所需年培训费/人
资料费用	$C_T = N_{pf} P_f N_f$	$C_A$	单人年空间费用
		$N_{pf} P_f$	修理产品所需一套资料的费用
材料费用	$C_M = F_y C_{YM}$	$N_{SO}, N_{SI}, N_{SD}$	基层级、中继级、基地级的修理场地数
		$F_y$	产品的年故障数
保障设备费用	$C_{SE-I} = R_{use-I} N_{SI} \times (P_{GS} + P_W P_C W_{\text{通用}} D_{\text{购买地到中继级}} + C_{YG} + C_{A(\text{通用})}) + N_{SI} (P_{SS} + P_W P_C W_{\text{专用}} D_{\text{购买地到中继级}} + C_{YS} + C_{A(\text{专用})})$	$C_{YM}$	单个产品所需材料费用
		$P_{GS}, P_{SS}$	通用、专用保障设备的单台价格
		$W_{\text{通用}}$	单台通用保障设备质量
		$W_{\text{专用}}$	单台专用保障设备质量
		$P_{C(\text{通用})}, P_{C(\text{专用})}$	通用保障设备、专用保障设备的运输与包装系数
		$D_{\text{购买地到中继级}}$	保障设备购买地到中继级场地的平均距离
		$D_{\text{购买地到基地级}}$	保障设备购买地到基地级场地的平均距离
		$C_{YG}, C_{YS}$	通用、专用保障设备的单台年维护费用
		$C_{A(\text{通用})}, C_{A(\text{专用})}$	通用、专用保障设备的单台年空间占用费
		$N_{GSE-I}, N_{SSE-I}$	通用、专用保障设备在中继级的数量
$N_{GSE-D}, N_{SSE-D}$	通用、专用保障设备在基地级的数量		
运输和包装费用	$C_{P\&T} = 2P_W P_{C(\text{送修})} W_{\text{送修}} D$	$R_{use-O}, R_{use-I}, R_{use-D}$	基层级、中继级、基地级产品修理对通用保障设备的利用率
		$W_{\text{送修}}$	送修产品的质量
		$P_{C(\text{送修})}$	送修产品的运输与包装系数
		$D_{\text{基层级到中继级}}$	基层级修理场地到中继级修理场地的平均距离
		$D_{\text{中继级到基地级}}$	中继级修理场地到基地级修理场地的平均距离
		$D_{\text{基层级到基地级}}$	基层级修理场地到基地级修理场地的平均距离

2.2.2 ELORA 模型

以费用最佳为原则建立水陆两栖飞机涉水结构 ELORA 数学模型。

$$M = \min \sum_{x \in X_s} \left( \sum_{e=1}^3 C_{e,x} N_{e,x} + \sum_{y \in \Gamma_x} \sum_{e=1}^3 C_{e,y} N_{e,y} \right) \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{e=1}^3 N_{e,x} = 1 \quad (x \in X_s) \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^3 N_{e,y} = 1 \quad (y \in \Gamma_x) \quad (3)$$

$$N_{e,x} \geq N_{e,y} \quad (e = 1, 2) \quad (4)$$

式中:  $e=1$  为中继级修理,  $e=2$  为基地级修理,  $e=3$  为报废;  $X_s$  为 LRU 集合;  $\Gamma_x$  为部件  $x$  的子部集合;  $C_{e,x}$  为部件  $x$  选择修理选项  $e$  的修理费用;  $C_{e,y}$  为部件  $y$  选择修理选项  $e$  的修理费用。

$$N_{e,x} = \begin{cases} 1 & (\text{部件 } x \text{ 的修理选项为 } e) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{e,y} = \begin{cases} 1 & (\text{子部件 } y \text{ 的修理选项为 } e) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

目标函数使所有待分析产品的修理总费用最少; 约束条件(2)、(3)限制了产品、子产品一定有

修理选项, 约束条件(4)限制了产品在基地级修理, 则子产品不可能在中继级修理。

在计算各修理级别修理费用时, 待分析产品在中继级修理的费用为

$$C_1 = C_{SP-1} + C_{F-1} + C_{P-1} + C_{T-1} + C_{M-1} + C_{SE-1} + C_{P\&T(\text{基层到中继})} \quad (7)$$

在基地级修理的费用为

$$C_D = C_{SP-D} + C_{F-D} + C_{P-D} + C_{T-D} + C_{M-D} + C_{SE-D} + C_{P\&T(\text{基层到基地})} \quad (8)$$

或者:

$$C_D = C_{SP-D} + C_{F-D} + C_{P-D} + C_{T-D} + C_{M-D} + C_{SE-D} + C_{P\&T(\text{中继到基地})} + C_{P\&T(\text{基层到中继})} \quad (9)$$

报废的费用为

$$C_X = 0.9P_S \quad (10)$$

3 算 例

以水陆两栖飞机涉水舱门上的接近开关(LRU)及其子部件(SRU1)为例进行 ELORA, ELORA 计算的输入参考某航空公司类似 LRU 的统计数据, 如表 2~表 8 所示。

表 2 备件费用计算相关输入

Table 2 Input data related to spare parts cost

待分析产品	$N_{0I}$	$N_{0D}$	$P_S/\text{元}$	$W_{\text{备件}}/\text{t}$	$V_{\text{备件}}/\text{m}^3$	$P_{C(\text{备件})}$	$P_W/\text{元}$	$D_{\text{购买地到中继级}}/\text{km}$	$D_{\text{购买地到基地级}}/\text{km}$	$S_W/(\text{元} \times \text{立方米}^{-1})$	$S_C$
LRU	1	1	5 000	0.000 3	0.000 10	0.2	5	1 200	2 000	800	0.55
SRU1	1	2	1 400	0.000 1	0.000 08	0.1	5	1 200	2 000	800	0.45

表 3 人员费用计算相关输入

Table 3 Input data related to people cost

待分析产品	$t_{\text{EMP-I}}/\text{h}$	$t_{\text{EMH-I}}/\text{h}$	$t_{\text{EMP-D}}/\text{h}$	$t_{\text{EMH-D}}/\text{h}$	$F_y$	$C_{YP-I}/\text{元}$	$C_{YP-D}/\text{元}$	$C_{YT-I}/\text{元}$	$C_{YT-D}/\text{元}$	$C_A/\text{元}$
LRU	2 700	3.0	2 700	2.0	3	60 000	70 000	50	60	100
SRU1	2 700	1.5	2 700	1.5	2	60 000	70 000	40	50	100

表 4 保障设备费用计算相关输入

Table 4 Input data related to support equipment cost

待分析产品	$P_{GS}/\text{元}$	$C_{YG}/\text{元}$	$W_{\text{通用}}/\text{t}$	$C_{A(\text{通用})}/\text{元}$	$R_{\text{use-I}}$	$R_{\text{use-D}}$	$P_{C(\text{通用})}$	$N_{GSE-I}$	$N_{GSE-D}$
LRU	10 000	5 000	0.01	200	0.10	0.05	0.6	2	3
SRU1	10 000	5 000	0.01	200	0.05	0.02	0.6	2	3

待分析产品	$P_{SS}/\text{元}$	$C_{YS}/\text{元}$	$W_{\text{专用}}/\text{t}$	$C_{A(\text{专用})}/\text{元}$	$P_{C(\text{专用})}$	$D_{\text{购买地到中继级}}/\text{km}$	$D_{\text{购买地到基地级}}/\text{km}$	$N_{SSE-I}$	$N_{SSE-D}$
LRU	5 000	100	0.000 5	15	0.56	800	1 100	1	3
SRU1	5 000	100	0.000 5	15	0.56	800	1 100	1	3



表 5 送修的运输包装费用计算相关输入  
Table 5 Input data related to transportation and packing cost

待分析产品	$P_{C(送修)}$	$W_{送修}/t$	$D_{\text{基层级到中继级}}/D_{\text{中继级到基地级}}/D_{\text{基层地到基地级}}/$ km	km	km
LRU	0.5	0.003	800	1 000	1 700
SRU1	0.3	0.001	800	1 000	1 700

表 6 设施费用计算相关输入  
Table 6 Input data related to facility cost

待分析产品	$C_{YF-I}/\text{元}$	$C_{YF-D}/\text{元}$	$R_{ufI}$	$R_{ufD}$
LRU	50 000	100 000	0.001 0	0.000 5
SRU1	50 000	100 000	0.000 8	0.000 1

表 7 资料费用计算相关输入  
Table 7 Input data related to document cost

待分析产品	$N_{pt}P_f/\text{元}$	$N_{SI}$	$N_{SD}$
LRU	100	3	1
SRU1	50	3	1

表 8 材料费用计算相关输入  
Table 8 Input data related to material cost

待分析产品	$F_y$	$C_{VM}/\text{元}$
LRU	3	150
SRU1	2	100

将以上数据代入 ELORA 模型,得到待分析产品在中继级、基地级的修理费用以及报废费用,计算结果如表 9 所示。

表 9 经济性修理级别分析计算结果  
Table 9 Result of ELORA

待分析产品	中继级修理费用/元	基地级修理费用/元	报废费用/元
LRU	11 196	23 417.0	20 700
SRU1	9 259	19 407.1	13 050

从经济性角度出发,待分析产品 LRU 和 SRU1 应在中继级进行修理,这和接近开关类似 LRU 在实际修理中的修理级别一致,说明本研究具有工程适用性。

## 4 结 论

(1) 本文提出的适用于涉水结构三级修理模式及涉水结构的 LORA 流程,能够满足我国大型水陆两栖飞机初期运营的维修保障要求。

(2) 确定的涉水结构 ELORA 模型应用于涉

水结构是可行的,本文的研究可以为水陆两栖飞机涉水结构 LORA 的研究提供参考。

## 参考文献

- [1] MARINO L C. Level of repair analysis for the enhancement of maintenance resources in vessel life cycle sustainment [D]. Washington D. C. : The George Washington University, 2018.
- [2] Department of Defense. Level of repair analysis: MIL-STD-1390D [S]. Washington, D. C. : Department of Defense, 1993.
- [3] BARROS L, RILEY M. A combinatorial approach to level of repair analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2): 242-251.
- [4] GUTIN G, RAFIEY A, YEO A, et al. Note: a graph-theoretical approach to level of repair analysis [R]. UK: UMIST, 2004.
- [5] TAOUFIK B, MOHAMMED K, LAURIE P. Level of repair analysis based on genetic algorithm with Tabu search [C]// 2010 World Congress on Engineering. [S. l. : s. n. ], 2010: 2166-2172.
- [6] SARANGA H, KUMAR U D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms: level of repair analysis [J]. Annals of Operations Research, 2006, 143: 91-106.
- [7] THYAGARAJAN S, GOLLNICK V. A novel decision support model for composite repair decision process [C]// First World Congress on Condition Monitoring. London: [s. n. ], 2017: 1-7.
- [8] RAWAT M R, LAD B. Joint optimization of reliability design and level of repair analysis considering time dependent failure rate of fleet system [J]. International Journal of Performance Engineering, 2020, 16(6): 821-833.
- [9] 吴昊, 左洪福, 孙伟. 一种新的民用飞机修理级别优化模型 [J]. 航空学报, 2009, 30(2): 247-253.  
WU Hao, ZUO Hongfu, SUN Wei. A new level of repair analysis optimization model for civil aircraft maintenance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 247-253. (in Chinese)
- [10] 薛陶, 冯蕴雯, 薛小锋, 等. 一种飞机修理级别经济性分析模型 [J]. 航空学报, 2013, 34(1): 97-103.  
XUE Tao, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, et al. An aircraft economic evaluation model for level of repair analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(1): 97-103. (in Chinese)
- [11] 贾宝惠, 于灵杰, 蒯越国, 等. 基于 AHP-SPA 方法的民机修理级别确定综合分析模型 [J]. 航空学报, 2017, 38(11): 183-191.  
JIA Baohui, YU Lingjie, LIAN Yueguo, et al. Comprehensive analysis model for determination of civil aircraft repair

- level based on AHP-SPA method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(11): 183-191. (in Chinese)
- [12] 贾宝惠, 邓婉怡, 王毅强. 三层三级民机修理级别经济性分析模型的改进[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 245-258.  
JIA Baohui, DENG Wanyi, WANG Yiqiang. Improvement of economical analysis model with three indenture and three echelon for civil aircraft repair level[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 245-258. (in Chinese)
- [13] 张帅, 糜玉林, 孙媛, 等. 基于备件短缺数的舰载机修理级别分析[J]. *光电与控制*, 2015, 22(7): 115-119.  
ZHANG Shuai, MI Yulin, SUN Yuan, et al. Level of repair analysis for shipboard aircraft based on expected back-orders[J]. *Electronica Optics & Control*, 2015, 22(7): 115-119. (in Chinese)
- [14] 李季颖, 朱四华, 戢治洪, 等. 舰载航空装备修理级别分析[J]. *海军航空工程学院学报*, 2017, 32(4): 383-388.  
LI Jiying, ZHU Sihua, JI Zhihong, et al. Level of repair analysis for shipboard aircraft equipment[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2017, 32(4): 383-388. (in Chinese)
- [15] 王旭. 空空导弹修理级别分析技术[J]. *四川兵工学报*, 2012, 33(12): 34-37.  
WANG Xu. Level of repair analysis for air-to-air missile[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(12): 34-37. (in Chinese)
- [16] 赵大磊, 黄定东, 李木易, 等. 某型导弹设备上设备修理级别分析[J]. *计算机与现代化*, 2013(7): 65-68.  
ZHAO Dalei, HUANG Dingdong, LI Muyi, et al. LORA for a certain missile-borne equipments[J]. *Computer and Modernization*, 2013(7): 65-68. (in Chinese)
- [17] 何春雨, 金家善, 孙丰瑞. 基于LINGO软件的舰船装备修理级别优化分析[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(1): 78-82.  
HE Chunyu, JIN Jiashan, SUN Fengrui. Optimization model of ship's equipment LORA based on LINGO[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(1): 78-82. (in Chinese)
- [18] 饶若曦, 唐彦峰, 周刚. 车辆装备修理级别非经济性分析[J]. *军事交通学院学报*, 2017, 19(7): 22-25.  
RAO Ruoxi, TANG Yanfeng, ZHOU Gang. Level of repair non-economic analysis for vehicle equipment[J]. *Journal of Military Transportation University*, 2017, 19(7): 22-25. (in Chinese)
- [19] 李慧梅, 封会娟, 张坚, 等. 基于最小费用流的车辆装备修理级别分析模型[J]. *军事交通学院学报*, 2020, 22(7): 34-37.  
LI Huimei, FENG Huijuan, ZHANG Jian, et al. Analysis model of vehicle equipment repair level based on minimum cost flow[J]. *Journal of Military Transportation University*, 2020, 22(7): 34-37. (in Chinese)
- [20] 李东帆, 陈跃良, 花海城. 海军某型飞机腐蚀的修理与防护[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(8): 58-64.  
LI Dongfan, CHEN Yueliang, HUA Haicheng. Repair and protection of certain naval aircraft corrosion[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(8): 58-64. (in Chinese)
- [21] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(2): 72-77.  
CHEN Qunzhi, FANG Zhenqian, KANG Xianhai. Methods for military aircraft field corrosion prevention and control[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(2): 72-77. (in Chinese)
- [22] 陈群志, 王逾涯, 崔常京, 等. 老龄飞机结构的腐蚀问题与对策[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(6): 1-9.  
CHEN Qunzhi, WANG Yuya, CUI Changjing, et al. Corrosion problems and countermeasures of the aging aircraft[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(6): 1-9. (in Chinese)
- [23] 中国民用航空总局. 民用航空器维修单位合格审定规定: CCAR-145-R2[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2001.  
Civil Aviation Administration of China. Provisions on the qualification examination of civil aircraft maintenance units: CCAR-145-R2[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2001. (in Chinese)

#### 作者简介:

田晶(1997-),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。

马小骏(1962-),男,博士,研究员级高级工程师。主要研究方向:民用飞机客户服务。

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。

胡宇强(1985-),男,学士,高级工程师。主要研究方向:飞机客服技术。

李阳(1985-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机维修工程。

(编辑:丛艳娟)