

文章编号: 1674-8190(2021)05-131-08

# 民用航空发动机维修工程分析平台设计与实现

蒋平<sup>1</sup>, 王向辉<sup>1</sup>, 宋利<sup>1</sup>, 龚艳<sup>2</sup>, 包丽<sup>2</sup>, 余涛<sup>2</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

(2. 上海市慧程航空科技有限公司 技术部, 上海 200241)

**摘要:** 随着国产民用大飞机的研制和应用, 民用航空发动机的研制和应用需求也逐步显现。为了提高国内民用航空发动机的派遣可靠性, 需要对其维修工程服务产品进行专业分析, 并通过信息化、规范化的方法促进其维修工程服务产品的发展和应用。首先, 研究民用航空发动机维修工程分析的技术应用和行业发展, 基于发动机维修工程分析和相关标准规范明确平台的核心模块功能和开发需求; 在此基础上, 开发发动机维修工程分析平台, 并通过实际操作测试平台的各项功能; 最后, 以发动机燃控系统为例验证该平台的可操作性。结果表明: 发动机维修工程分析平台各项功能正常、流程完善、数据合理, 为后期设计优化和工程迭代工作奠定了重要的数据基础。

**关键词:** 民用航空; 发动机; 维修工程分析; S3000L; 管理平台

**中图分类号:** V267

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.18

**文献标识码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Design and Implementation of Maintenance Engineering Analysis Platform for Civil Aero-engine

JIANG Ping<sup>1</sup>, WANG Xianghui<sup>1</sup>, SONG Li<sup>1</sup>, GONG Yan<sup>2</sup>, BAO Li<sup>2</sup>, YU Tao<sup>2</sup>

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. Department of Technology, Shanghai H-Visions Aviation Technology Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** With the development and application of civil aircraft, the demand for the development and application of aero-engine has gradually emerged. In order to improve the dispatch reliability of aero-engine, it is necessary to conduct professional analysis about maintenance engineering, and promote the development and application of the service products with information-based and standardized methods. Firstly, the background and industry development about maintenance engineering analysis of aero-engine are introduced in this paper. The core module functions and development requirements about the platform are clarified based on engine maintenance engineering analysis and related standards and specifications. Then, the platform of maintenance engineering analysis is developed. Finally, the operability of the platform is verified by using the engine combustion control system as a case. Results show that with the construction and use of the platform, the analysis of maintenance engineering of engine will be much more standardized, and laid an important data foundation for later design optimization and engineering analysis iteration.

**Key words:** civil aviation; engine; maintenance engineering analysis; S3000L; management platform

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-28

通信作者: 蒋平, jiangp@acaec.com.cn

引用格式: 蒋平, 王向辉, 宋利, 等. 民用航空发动机维修工程分析平台设计与实现[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 131-138.

JIANG Ping, WANG Xianghui, SONG Li, et al. Design and implementation of maintenance engineering analysis platform for civil aero-engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 131-138. (in Chinese)

## 0 引言

随着国内外航空发动机的使用和维修需求不断提高,国际发动机制造厂家(通用电气、普惠、罗罗等)均建立了维修保障服务体系,在维修工程、技术出版物、航材保障等专业开展了大量工作,这些措施既提升了发动机产品的客户服务质量,又降低了发动机产品全寿命周期维修保障成本<sup>[1]</sup>。此外,中国民航局也制定了相关规范,要求航空器制造厂家建立相应的运行支持体系,用以保证其航空器及发动机的运维水平<sup>[2-3]</sup>。

国内关于维修工程分析方法和平台的研究虽然起步较晚,但范围广、速度快,涵盖了军用飞机、民用飞机和船舶等多个领域。关于候选项的研究,敬军等<sup>[4]</sup>结合船舶的4A需求对S3000L规范中候选项的判定方法进行了优化和完善,提出了一种覆盖货架产品、标准件和散装件的候选项判定方法。计划维修分析方面,柏文华<sup>[5]</sup>以MSG-3为指导思想,结合S3000L规范构建了大飞机的维修大纲工作流程,以支持主制造商和供应商开展维修工程分析工作,该方法与国际机型的维修工程分析工作<sup>[6]</sup>相一致;夏哲<sup>[7]</sup>将MTA方法结合国产民用飞机研制经验进行了实践和应用,提出了国产民用飞机维修工程分析的工作程序和方法。维修工程分析数据和维修成本方面,蒋庆喜<sup>[8]</sup>以MSG-3规范为基础,对维修数据进行了研究,以指导维修工程分析的编制和应用。对于维修工程分析的研究,主要以S3000L、S4000P、MSG-3等标准/规范开展<sup>[9-12]</sup>。而在维修数据收集和优化方面,徐小芳等<sup>[13]</sup>、Hong Sheng等<sup>[14]</sup>提出了多种RCM数据优化方法以提高产品维修性,包括试飞阶段维修数据收集和优化。

不难看出,基于S3000L的维修工程分析工作通过一整套系统的流程和方法,规范了维修工程分析的工作内容和输出数据,是提高产品保障性、派遣可靠度的重要工作指南。因此,维修工程分析也日益成为发动机综合后勤保障服务的核心业务,对于发动机技术出版物和航材工程等专业的开展工作至关重要。而维修工程分析平台作为维修工程分析和维修任务制定的重要载体和信息化工具,对于确保航空发动机维修工程设计的合理性、规范性具有重要意义。而当前维修工程信息化平台主要围绕综合保障设计、维修计划制定等工作,在航空发动机维修工程分析领域的应用较为薄弱<sup>[15-17]</sup>。

对于航空发动机维修工程分析,发动机制造厂家又面临以下两个问题:(1)在民用航空发动机维修工程分析领域,维修工程专业多以MTTR、MTBR等维修性指标为依据开展发动机的维修性设计和分配工作<sup>[18-19]</sup>,这些工作相对侧重产品的设计指标,无法直接满足航空器制造厂家的维修工程分析要求,也难以指导航空公司制定具体的维修方案和维修任务。因此,发动机制造厂家必须先建立符合维修工程分析的技术方案,再将其应用到平台上。(2)在平台应用方面,OmegaPS等虽然满足了航空器维修工程分析的基本要求,但对于航空发动机维修工程分析,又有两点不足:①缺乏对S系列规范的有效融合,难以满足技术出版物等专业的需求,在服役数据的收集和优化管理上也存在问题;②对于航空发动机维修工程分析,在技术参数方面缺乏针对性,需要做二次开发和梳理工作。

为了确保航空发动机维修工程分析工作及其数据的完整性和可持续发展,本文以S3000L、S4000P等规范为基础开展民用航空发动机维修工程分析平台的设计和开发工作,并以发动机燃控系统为例来验证平台的可操作性;通过维修工程分析平台的研制和验证,完善航空发动机维修工程分析工作的技术要求。

## 1 基于标准的分析平台设计

### 1.1 平台开发需求分析

维修工程分析是维修支援体系的基础和核心,是对发动机产品维修要求进行约束、确定维修对象、维修程序、维修资源、维修费用的基础,为维修培训、航材管理、技术出版物、工具设备提供基础输入。其目的是通过产品研制数据,解决维修什么、怎么维修、何时维修、在哪维修、怎么维修经济等重要问题。维修工程分析平台作为维修工程分析的载体,其开发需求应结合发动机使用和维修分析工作中的各项内容进行具体分析。

平台开发需求分析工作的开展,首先以S3000L<sup>[20]</sup>、S4000P<sup>[21]</sup>规范为基础,结合航空发动机维修工程展开深入研究,维修工程分析涵盖如下内容:

(1)维修工程分析活动选择:依据维修工程分析总体要求进行维修工程分析活动选择,满足发动机产品维修类客户服务产品开发需要;

(2) 顶层工作流程开发、确定分析方式:明确各项工作内容,并进行流程控制;

(3) 维修工程分析活动基本流程定义:针对每项分析活动定义基本的分析流程;

(4) 内外部接口/输入输出关系定义:给出维修工程分析内部接口关系,给出维修工程与航材管理、技术出版物、维修培训等维修类客户服务产品研发间的接口关系;

(5) 维修工程分析源数据清单梳理:针对各项维修工程分析活动,给出源数据清单;

(6) MEA 候选项清单编制方法:针对各项维修工程分析活动给出候选项编制方法;

(7) MEA 顶层架构适用性评估:针对发动机产品设计属性及维修类客户服务产品需求,进行适用性评估。

同时,参考国内外已有航空维修工程实践经验,以及国内民航产品研制项目经验,结合国内航空产品设计理念及变化趋势,研究规范在民用航空发动机维修工程分析上的具体应用,并适当剪裁。平台的主要功能需求包括但不限于:

- (1) 候选项定义和分析;
- (2) 产品综合保障分析——故障模式影响分析;
- (3) 排故需求分析;
- (4) 使用相关分析。

此外,还结合维修工程分析的工作内容,开展计划维修任务模块的需求分析。各模块的初步需求以及功能目标如表 1 所示。

表 1 发动机维修工程分析平台需求  
Table 1 Platform requirements about engine maintenance engineering analysis

功能模块	初步需求	
LSA FMEA (综合保障分析——故障模式影响分析)	完全候选项	
	局部候选项	
	候选项集	
TSA(排故分析)	排故分析候选项	
SMA (计划维修分析)	系统	重要维修项目 MSI
	结构	重要结构项目 SSI
	区域	区域分析候选项
DSEA(特殊事件分析)	特殊事件候选项	
LROA(使用相关分析)	使用相关候选项	
SSA(软件保障分析)	软件保障候选项	
LORA(修理级别分析)	修理级别候选项	
DMC(直接维修成本)	DMC 候选项	

## 1.2 平台功能设计

前期需求分析工作主要基于 S3000L、S4000P、ATA2200 等规范开展,并结合维修工程分析总体要求和工程人员的实际使用需求开展平台设计。维修工程分析平台的功能模块和核心功能架构如图 1 所示。

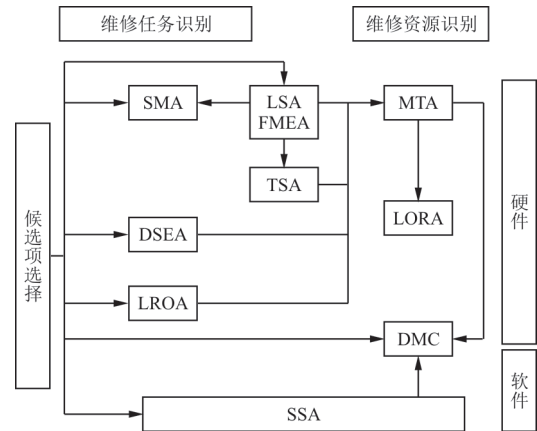


图 1 模块化设计

Fig. 1 Interface of module

各模块的功能如下:

(1) 候选项选择模块:主要实现对发动机系统候选项与系统标准规范间的关联与确认、候选项分析、变更等具体功能。

(2) 计划维修分析(Schedule Maintenance Analysis,简称 SMA)模块:主要实现维修重要项目、结构重要项目、区域重要项目的分析工作,包括项目选择、确认、分析、汇总以及报告编制等功能。

(3) 综合保障分析故障模式影响分析(Logistic Support Analysis Failure Mode and Effect Analysis,简称 LSA FMEA)模块:主要实现候选项 FMEA 数据整理、FMES、任务分析和报告编制等功能。

(4) 损伤及特殊事件分析(Damage and Special Events Analysis,简称 DSEA)模块:主要实现特殊事件项目创建、任务分析、任务合并以及报告编制等功能。

(5) 后勤相关使用分析(Logistics Related Operations Analysis,简称 LROA)模块:主要实现 LRO 任务创建、任务分析和报告编制等功能。

(6) 排故分析(Trouble Shooting Analysis, 简称 TSA)模块: 主要实现排故需求创建、任务分析、排故程序制定和排故分析报告编制等功能。

(7) 维修任务分析(Maintenance Task Analysis, 简称 MTA)模块: 主要实现维修任务导入、维修任务合并、频次计算和优化、MTA 分析报告编制等功能。

(8) 修理级别分析(Level of Repair Analysis, 简称 LORA)模块: 主要实现修理级别创建、修理级别分析和决策、LORA 分析报告编制等功能。

(9) 直接维修成本(Direct Maintenance Costs, 简称 DMC)模块: 主要实现维修项目目标值分析、预测, 子系统成本分析和发动机运营成本分析等功能。

除维修工程分析核心功能外, 平台还包括标准管理、权限管理、基础数据配置、项目管理、质量控制、源数据管理、文档管理等功能, 实现维修工程分析全过程规范化、过程监控可视化、构型与数据管理集成化, 保证了分析数据的完整性、准确性、有效性, 最终确保数据存储、传输、使用的安全和准确。

## 2 基于 B/S 架构的平台开发和实现

维修工程分析平台的开发采用 B/S 架构。该模式可以实现客户登录端口的统一管理, 并将平台功能的实现集中到主服务器中, 确保数据的安全。采用 B/S 架构还具有功能权限开放灵活、维护便捷、扩展兼容性良好的优势, 便于平台后期的持续优化。

### 2.1 平台的技术架构

维修工程分析平台基于 MVC 模式将整个系统分为表示层、业务层、基础架构层和数据库层, 如图 2 所示。

各层的实现方式如下:

(1) 表示层: 采用并列形式展示系统管理、基础数据管理、维修工程分析等功能模块, 表示层采用形式化表达方式构建交互界面, 便于维修工程分析人员准确、简洁地定位分析工作。表示层还包括系统登录、任务分派、维修工程会议等工作界面。

(2) 业务层: 是将各分析模块具体分析方法和

算法模型封装到具体模块中, 结合工作流程和数据驱动, 业务层还包括各类分析报告的生成。业务层主要包括产品分解、分析工具模块两类业务。产品分解基于产品型号、构型、区域和功能等对发动机产品进行候选项分解。分析工具模块则包括具体的各维修工程分析模块。

(3) 基础框架层, 平台的中间层: 通过软件工程产品分解模型组件和各类分析数据报表等将维修工程人员填写的信息存储到数据层的表单中。基础框架层实现了工作流引擎、日志组件等基础功能。

(4) 数据库层: 采用关系型数据库和开源大数据构成, 用于存储平台中产生的发动机维修工程分析数据, 包含发动机型号信息、构型信息、维修需求信息、工程数据等。数据层还可以通过符合 S3000L 数据库协议的各类报表模板、过滤器加工、存储、输出标准化、规格化的维修工程分析数据。



图 2 维修工程分析平台架构

Fig. 2 Architecture of maintenance engineering analysis platform

### 2.2 平台的实现

平台采用 B/S 架构中较为先进的 SPA 架构开发, 其前后端互相分离。前端使用 HTML5、JavaScript、AngularJS、Bootstrap 技术实现功能, 使用浏览器作为容器及运行环境; 后端采用符合 REST 规范的 WebAPI 提供微服务, 以 HTTP 协议和 JSON 格式的数据与前端进行交互。底层数据库可支持关系型数据 Oracle、MySQL、SQLServer 和大数据

平台 Hadoop,也可支持关系型数据库+大数据的复合架构。

平台采用 JAVA 语言开发,技术路线的设计思想按照 MVC 设计模式,分为三层架构,应用 web 服务层,提供页面与用户进行人机交互,javaee 层提供后台逻辑,为前台页面提供数据支撑。数据层采用关系型数据库,对结构化数据进行表存储。

基于 SPA 架构下开发的应用,具有界面响应快、界面美观、功能易于扩展、支持移动终端等特点。开发完成的平台可在不同网络状态的设备上进行操作和数据处理,满足了多用户、多终端的维修工程分析工作需求。通过平台实施,为维修工程分析人员提供高效率的维修工程分析过程。维修工程分析平台典型工作界面如图 3 所示。

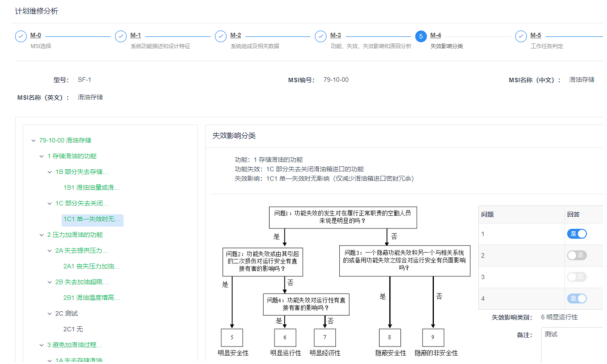


图 3 维修工程分析平台典型工作界面

Fig. 3 Interface of platform about engine maintenance engineering analysis

### 3 平台测试和样例验证

#### 3.1 测试过程

平台的功能测试主要包括三大步骤:(1)项目管理测试,(2)候选项管理模块测试,(3)分析模块测试(以 LSA FMEA 模块为例)。

用户登录平台后,首先进入项目管理界面(如图 4 所示),在项目管理中实现如下功能:

(1) 分析计划管理、会议计划管理等功能,全面实现基于分析程序的任务动态分配与提醒、计划动态定义、任务完成情况监控、行动项定义与监控等。

(2) 各子功能间应建立强关联关系,实现数据集成管理。

(3) 项目监控功能与候选项管理、会议管理、构型管理等功能强关联,能够有效控制源数据、会

议、候选项等触发的计划变更。

(4) 具有高级筛选功能,具备不同维度、不同利益相关方及其不同层级的报表输出功能。

(5) 应配置适用的维修工程分析工作程序、分析指南等,其中计划维修需求开发工作流程应基于型号政策与程序手册等定义。

(6) 实现基于流程的角色、权限定义与变更,实现不同利益相关方及其不同层级的工作任务指派与变更。

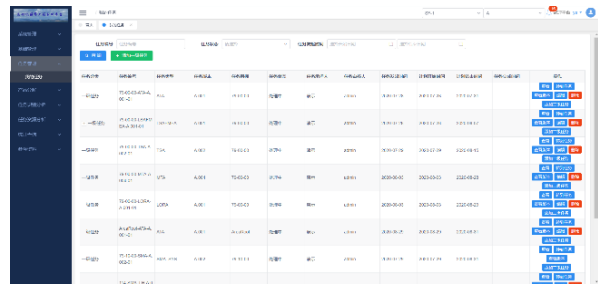


图 4 项目管理界面

Fig. 4 Interface of program management

项目创建成功后,导入对应的发动机产品数据以便进行候选项选择。候选项管理模块与项目监控模块、维修工程分析各模块等强关联。候选项分析的功能包括:①实现候选项选择与分类逻辑、分析活动选择逻辑的配置及变更;②实现 SNS 的批量导入,并提供 SNS 手动修改功能;③实现 SNS 的候选项选择与分类,选择与分类过程符合质量管理要求;④实现候选项选择的分析活动选择,分析活动选择过程符合质量管理要求;⑤实现候选项变更管理,变更管理符合构型管理要求。

候选项选择完成后,用户可进入正式的维修工程分析过程,LSA FMEA 分析界面如图 5 所示。

(1) 实现基于 SNS 的 LSA 系统树构建与手动修改;

(2) 实现系统描述内容的编制,包括文字与插图;

(3) 实现工程 FMEA/FMECA 的批量导入与手动修改;

(4) 配置综合保障分析故障模式(Logistic Support Analysis Failure Mode,简称 LSA FM)定义逻辑,自动生成 LSA FM 编号,LSA FM 与 FMEA FM 自动关联;

(5) 实现 LSA FM 频率的自动计算;

(6) 实现 FM 探测能力等级及虚警率等级定

义,支持地面支援设备(Ground Support Equipment,简称GSE)需求识别、测试性设计反馈等。

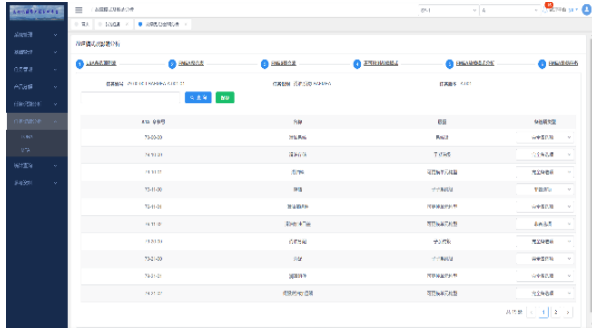


图5 LSA FMEA分析界面

Fig. 5 Interface of module for LSA FMEA

### 3.2 基于燃油分配子系统的样例验证

以发动机燃油分配子系统(73-11)为对象在维修工程分析平台(原型系统)开展工程分析测试。发动机燃油分配子系统包含五个部件,如图6所示,分别为燃油泵、燃油过滤模块、喷油嘴、燃油供给总管和燃油供给管路。

通过将对应的部件设为候选项,分别开展LSA FMEA分析、MTA分析等工作。

首先,登录并创建型号项目,然后导入对应的发动机产品型号数据。基于产品结构分解得到可用于维修任务分析的候选项。

第二步,选择对应的候选项,候选项包括燃油泵、燃油过滤模块、喷油嘴、燃油供给总管和燃油供给管路,对候选项进行初步分析。

第三步,对燃油分配子系统开展FMEA分析,具体包括:LSA系统树构建、故障模式分组、故障模式探测方法分析、故障模式定位方法分析、报表

生成。

第四步,将FMEA分析数据导出到MTA,开展MTA分析,将维修任务分解为作业步骤进行详细分析,用以确定各项产品支援工作所需的资源要求,包括维修任务的确认、任务编排、工序、工作频度、建议工时,以及各项工作所需的维修资源(如备件、保障设备、技术手册、维修人员数量及技术等级)。

第五步,维修任务汇总,针对燃油分配子系统不同故障原因导致的相同维修任务进行汇总。最终得到燃油分配系统的维修任务汇总清单,如表2所示。

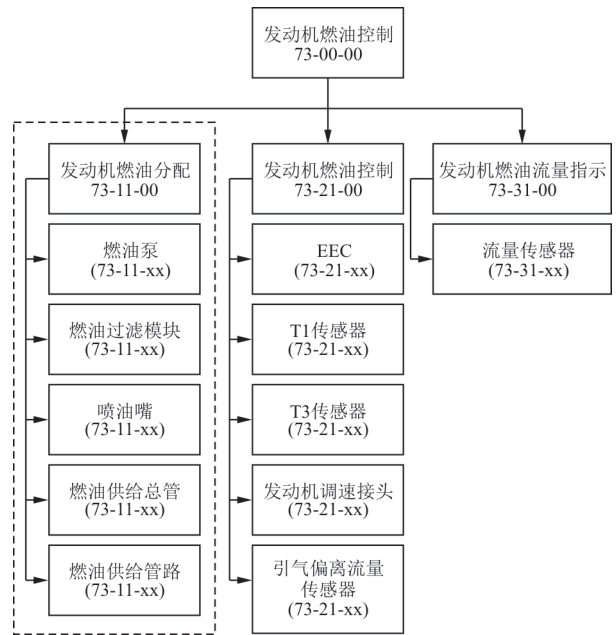


图6 样例:燃油控制系统

Fig. 6 The sample about fuel control system

表2 维修任务汇总

Table 2 Summary of maintenance task

MSI编号:73-11		MSI标题:发动机燃油分配				有效性:XX	
故障原因	故障影响类别	任务号	任务类型	任务描述	有效性	间隔	区域候选项
1A1A							
1A1C	7	73-11-00-001	FNC	功能检查	XX	2 000 fh	否
1A1D							
2A1A							
2A1B	7	73-11-00-002	SPC	特别详细检查	XX	2 000 fh	否
2A1C							

## 4 结 论

(1) 航空发动机维修工程分析平台设计以使用需求和S3000L等规范为基础,该平台的研制表明航空发动机客户服务维修产品开发技术有了重大提升,为发动机产品全寿命周期的综合保障数据收集、优化等工作奠定了良好的信息化基础。

(2) 维修工程分析平台的设计工作重点在于在数据设计上应符合标准中对各元素的定义。在此基础上,业务方面也需要结合不同类型的航空发动机维修工程的分析需求进行细化和定制。

(3) 在S系列规范/标准融合的背景下,维修工程分析的工作成果将作为技术出版物、航材管理等工作的重要输入。平台未来的开发和优化应综合考虑不同业务领域所用标准的数据交换需求,确保维修工程分析的成果转化更加高效、准确。

### 参考文献

- [1] 孙立. 发动机维护服务的现状与未来[J]. 航空维修与工程, 2011(2): 29-31.  
SUN Li. The present and future of total care[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2011(2): 29-31. (in Chinese)
- [2] 马超, 王玉娜. 民用航空发动机持续适航维修特性评估[J]. 航空发动机, 2019, 45(4): 97-102.  
MA Chao, WANG Yuna. Evaluation on continuous airworthiness maintenance characteristics of civil aviation engine[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 97-102. (in Chinese)
- [3] 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 Administrator of China. Standard for constraint of operational support system of aircraft manufactures: MD-FS-AEG006[S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- [4] 敬军, 周兴攀. 基于S3000L标准优化的保障性分析候选方法研究[J]. 质量与可靠性, 2020(1): 29-34.  
JING Jun, ZHOU Xingpan. A study on optimal logistic support analysis candidate method based on S3000L standard[J]. Quality and Reliability, 2020(1): 29-34. (in Chinese)
- [5] 柏文华. 民用飞机维修大纲制定的关键技术及方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
BAI Wenhua. Research on major technology and method for civil aircraft MRBR development [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [6] Airbus. A318/A319/A320/A321 maintenance program development policy and procedures handbook [S]. Europe: Airbus Company, 2001.
- [7] 夏哲. 基于S3000L的MTA方法在民用飞机领域的应用研究[J]. 航空维修与工程, 2015(5): 61-64.  
XIA Zhe. Research on the application of MTA methods based on S3000L in civil aircraft industry[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(5): 61-64. (in Chinese)
- [8] 蒋庆喜. MSG-3分析中维修任务数据的编制及应用分析[J]. 航空维修与工程, 2020(5): 41-43.  
JIANG Qingxi. Development and application of maintenance task data in MSG-3 analysis[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2020(5): 41-43. (in Chinese)
- [9] 庚桂平. S3000L《后勤保障分析国际程序规范》介绍[J]. 航空标准化与质量, 2013(3): 49-53.  
GENG Guiping. Introduction of S3000L "International Procedure Specification for Logistics Support Analysis" [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2013(3): 49-53. (in Chinese)
- [10] 姬长法, 蒋平. 基于S3000L的维修工程分析技术研究[J]. 航空维修与工程, 2019(9): 64-69.  
JI Changfa, JIANG Ping. Research on maintenance engineering analysis technology based on S3000L [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(9): 64-69. (in Chinese)
- [11] 王南松, 王凌. S4000P规范下装备预防性维修分析方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2020(2): 162-168.  
WANG Nansong, WANG Ling. Study on equipment preventive maintenance analysis method based on S4000P specification [J]. Computer Measurement & Control, 2020(2): 162-168. (in Chinese)
- [12] 南雁飞, 蒋庆喜, 林聪. 基于S4000P的军用飞机预防性维修任务优化研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 577-584.  
NAN Yanfei, JIANG Qingxi, LIN Cong. Research of preventive maintenance task optimization of military aircraft based on S4000P [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 577-584. (in Chinese)
- [13] 徐小芳, 高雅娟, 武红姣. 基于试飞数据的航空发动机维修性分析优化技术研究[J]. 航空维修与工程, 2020(8): 60-63.  
XU Xiaofang, GAO Yajuan, WU Hongjiao. Research on analysis and optimization of maintainability for aero-engine based on flight test data [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2020(8): 60-63. (in Chinese)

- [14] HONG Sheng, YUE Tianyu, LIU Hao. Vehicle energy system active defense: a health assessment of lithium-ion batteries [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2020 (10): 1-19.
- [15] 张德立. 复杂产品综合后勤保障系统的关键技术研究及实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
ZHANG Deli. Research and realization on the key technology of the comprehensive logistics support system for complex products [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 许凯, 周斌, 封会娟, 等. “车辆装备维修任务分配辅助决策系统”数据库设计[J]. *电脑与信息技术*, 2019, 27(4): 75-78.  
XU Kai, ZHOU Bin, FENG Huijuan, et al. Database design of “Auxiliary Decision System of Vehicle Equipment Maintenance Task Allocation” [J]. *Computer and Information Technology*, 2019, 27(4): 75-78. (in Chinese)
- [17] 杨盼. 航空维修故障管理信息平台设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
YANG Pan. Design of aviation maintenance fault management information platform [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [18] 卢婷婷, 陈乃威, 孙见忠. 新研商用航空发动机的维修性指标分配方法研究[J]. *航空维修与工程*, 2020(1): 45-48.  
LU Tingting, CHEN Naiwei, SUN Jianzhong. Research on method of maintenance target allocation of newly developed commercial aero-engine [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2020(1): 45-48. (in Chinese)
- [19] SAJARADJ Z, HUDA L N, SINULINGGA S. The application of reliability centered maintenance (RCM) methods to design maintenance system in manufacturing (Journal Review) [C] // 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Engineering. Medan City North Sumatera, Indonesia: IOP Publishing Ltd., 2019: 012058.
- [20] ASD/AIA. International procedure specification for logistics support analysis: S3000L[S]. Europe: ASD/AIA, 2014.
- [21] ASD/AIA. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance: S4000P [S]. Europe: ASD/AIA, 2018.

#### 作者简介:

蒋平(1978—),男,博士,研究员级高级工程师。主要研究方向:航空发动机运行支持及客户服务技术。

王向辉(1987—),男,学士,工程师。主要研究方向:航空发动机运行支持及客户服务技术。

宋利(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机运行支持及客户服务技术。

龚艳(1985—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机运行支持及客户服务技术。

包丽(1978—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机运行支持及客户服务技术。

余涛(1991—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机运行支持及客户服务技术,航空器维修工程技术。

(编辑:马文静)