

文章编号:1674-8190(2020)04-577-08

基于 S4000P 的军用飞机预防性维修任务优化研究

南雁飞, 蒋庆喜, 林聪

(中国航空综合技术研究所 装备服务产品部, 北京 100028)

摘要: 预防性维修是恢复和保持飞机安全性和可靠性的主要措施,其优化一直以来都是飞机制造商和使用方共同关注的问题。本文调研国际上主流的预防性维修任务优化方法及主要应用对象,并以适用于装备的 S4000P ISMO 流程为基础,结合军用飞机的特点,对原流程进行调整和个性化设计,构建预防性维修任务优化的逻辑流程。结果表明:该任务优化流程可用于军用飞机预防性维修任务的优化分析。

关键词: 预防性维修;维修任务优化;S4000P; ISMO;优化逻辑

中图分类号: V267+.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research of Preventive Maintenance Task Optimization of Military Aircraft Based on S4000P

NAN Yanfei, JIANG Qingxi, LIN Cong

(Department of Equipment Service, China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract: Preventive maintenance is the main measure to restore and maintain the safety and reliability of the aircraft, and its optimization as a common concern is concerned by both aircraft manufacturers and users. The international mainstream preventive maintenance task optimization methods and their applicable objects are investigated. Based on the S4000P ISMO (in-service maintenance optimization) process suitable for equipment, the characteristics of military aircraft is combined to perform the adjustment and personalized design for the original process, and construct the logic process of preventive maintenance task optimization. The results show that the task optimization process can be used for the optimization analysis of military aircraft preventive maintenance task.

Key words: preventive maintenance; maintenance task optimization; S4000P; ISMO; optimization logic

0 引言

军用飞机要在高强度的局部战争条件下保持并恢复战斗力,保证任务可靠性和战备完好性,需要一种兼顾安全性、任务性和经济性并且实施性强的维修方案。由于飞机在研制阶段缺少服役数据,

预防性维修任务的制定偏向保守。随着试飞和服役期间数据的不断积累,各系统和部件之间的磨合越来越稳定,飞机的可靠性水平逐渐趋于平稳,传感器技术和综合诊断等支持维修的新技术不断发展与应用^[1]。如果依然按照服役初期规划的维修任务和间隔实施维修工作,不仅会占用额外的维修

收稿日期:2020-03-27; 修回日期:2020-04-25

基金项目:国家自然科学基金(71801198);装备综合保障技术重点实验室稳定支持项目(61420030301)

通信作者:林聪, linc@cape.avic.com

引用格式: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)

资源,而且过于频繁的维修活动还会使飞机遭受人为差错损坏的风险增大。因此,在服役期间需要对预防性维修任务进行持续的优化和调整,以保证维修方案持续的有效性和科学性。在累积了充足的服役数据后,通过数据分析的手段探索维修任务优化的潜力,提高飞机的维修保障效能,使维修工作更加科学有效、安全可靠。

国外对维修任务的优化进行了大量的研究,A. Regattieri 等^[2]以维修任务对经济性指标的影响为切入点,通过数学模型和仿真分析,给出维修任务优化的建议;D. Stadnicka 等^[3]以一组维修任务为研究对象,缩短飞机停机时间为目标,通过数学模型的构建与分析,给出该组维修任务执行的最优流程。国内张节等^[4]、刘成等^[5]、朱兴动等^[6]对 S4000P 在军民用飞机维修大纲制定和优化方面的应用进行了研究,明确了应用该规范时的要点;安迪森^[7]、蔡景等^[8-9]、贾宝惠等^[10]、林旭^[11]在维修任务间隔优化方面进行了深入研究,提出了间隔优化的计算模型和理论方法;周定国^[12]、许燕菲^[13]、张远^[14]、门江^[15]结合工作实践阐述了维修方案的优化逻辑;杨王锋^[16]在研究民用飞机维修大纲优化的基础上提出了适合军用飞机的维修大纲优化流程。但针对如何基于 S4000P ISMO 流程构建适合我国军用飞机的预防性维修任务优化流程,国内尚无相关研究。

本文以 S4000P 规范的 ISMO 流程为基础,考虑军用飞机的使用实际,对原流程进行调整和个性化设计,构建预防性维修任务优化的逻辑流程,以期为军用飞机维修任务的优化分析工作提供技术参考。

1 预防性维修任务优化研究概况

目前国际民用航空行业普遍认可的预防性维修任务优化的指导文件是国际维修审查政策委员会(International Maintenance Review Board Policy Board,简称 IMRBPB)发布的 IP44。IP44 最初由加拿大民航局(Transport Canada Civil Aviation,简称 TCCA)于 2001 年提出,是对维修大纲(Maintenance Review Board Report,简称 MRBR)进行持续优化的建议,一经提出就得到多个国家适航当局的支持。经过 IMRBPB 的积极倡导,2008 年发布了第 1 版 IP44。随后波音公司提出对于不

同任务优化进行分类的 IP116^[17],促进了 IP44 继续发展,目前最新版本为第 3 版^[18]。该方法从飞机各相关单位职责、数据质量要求、数据完整性要求、数据分析和数据审查方面提出了政策性指导意见。IP44 是对 MSG-3^[19]的重要补充,其推荐的维修任务优化方法及流程是维修大纲审查活动不可分割的一部分^[20]。

波音公司在维修任务优化方面走在了前列,其开发的统计分析方法使用一系列算法和高级统计分析技术对服役期间的各类数据进行分析,以确定维修任务最佳的间隔,该方法已被美国联邦航空局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)、欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency,简称 EASA)和加拿大民航局批准使用。波音公司在该方法基础上开发了基于统计分析的维修优化系统(Statistical Analysis System for Maintenance Optimization,简称 SASMO),其逻辑流程图如图 1 所示。SASMO 主要包括可靠性模型和成本模型,其中可靠性模型考虑了计划维修任务检查出问题的概率以及间隔延长带来的风险;成本模型综合考虑计划维修成本与非计划维修成本,探索满足安全条件限制的最低成本对应的维修间隔。波音公司使用 SASMO 系统对 B737NG 飞机 4 000 fh 维修任务进行分析,80%的计划维修任务间隔可以延长,10%的任务保持不变,10%的任务间隔缩短,在不降低安全性和可靠性的前提下,大幅度优化了飞机的维修工作量。虽然优化的目标通常倾向于维修任务间隔的延长,但实践证明优化分析也可能导致间隔的缩短,以尽量减少非计划维修任务的发生。

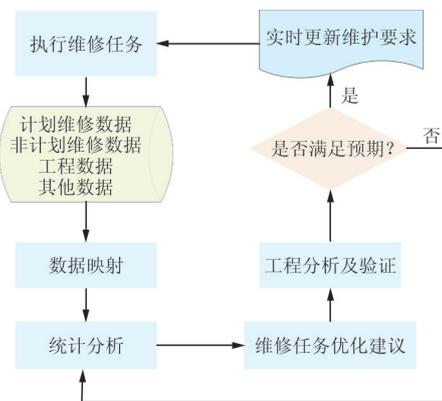


图 1 SASMO 逻辑流程图

Fig. 1 SASMO logic process

空客公司在维修任务优化方面的研究和实践一直没有停止过。以其最畅销的 A320 系列飞机为例,其初始的 A 检间隔为 350 fh,经过三十多年的经验积累和技术升级,目前 A 检间隔已达到 750 fh。而最新型号 A350 的 A 检间隔为 1 200 fh,空客正在对 2014 年交付以来的所有服役数据进行评估,尝试将 A 检间隔扩展至 1 500 fh,进一步减少维修工作量,提高飞机可靠性水平。2017 年推出了“智慧天空”大数据平台,其中基于数据分析的维修方案优化是平台重要功能之一,能够有效提升航空公司在工程和维护方面的工作效率。

欧洲宇航与防务工业协会(Aerospace and Defense Industries Association of Europe, 简称 ASD)总结了工业领域预防性维修大纲制定和优化方面的研究和应用经验,于 2014 年发布了 S4000P《预防性维修大纲制定与持续改进国际规范》(1.0 版)。经过 4 年多的研究修订,于 2018 年 8 月发布了 2.0 版本,该规范提供了一套清晰的分析程序与方法,用于复杂设备(包括军用飞机、民用飞机和船舶等)投入使用前预防性维修大纲的制定和服役期间维修大纲的持续改进。S4000P 第三章阐述了用于预防性维修任务优化的通用逻辑流程(服役阶段维修优化)如图 2 所示^[21],此流程由工作步骤、逻辑判断和决策建议组成,可以指导预防性维修任务和间隔的优化分析。

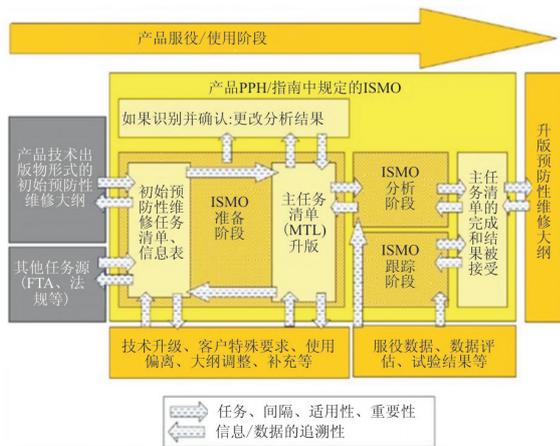


图 2 ISMO 流程
Fig. 2 ISMO process

2 基于 S4000P ISMO 的军用飞机维修任务优化流程构建

ISMO 分析流程充当检验预防性维修任务的

“试验台”,利用飞机服役阶段使用和维修的真实数据验证预防性维修任务分析时提出的假设和型号审查的要求。可用的服役经验越多,分析得到的优化结果有效性越高。ISMO 流程的输入数据包括多个信息源,例如使用数据、故障数据、维修数据、设计数据、经验数据、技术改装等。分析人员根据数据类别分别对其进行梳理和逻辑判断,对综合判断的结果进行分析,最后给出优化建议,并对优化后的执行情况进行监控,反馈优化后出现的异常情况以便对维修任务进行及时调整,保证装备的安全性、可靠性和经济性。

ISMO 适用于在役装备,在积累了充足的服役经验后,应及时建立 ISMO 优化流程,其工作示意图如图 3 所示^[21]。优化工作在飞机整个服役阶段需要多次执行,其中首次 ISMO 优化流程工作量最大,由于首次优化初期需要收集大量的数据,除了服役期间的使用数据和维修数据外,还需要收集生成预防性维修任务时的所有分析数据,而这部分数据可以在后续的历次优化过程中重复使用。另外,飞机交付使用至执行首次维修任务优化期间,来自制造商和供应商的试验结论及来自用户的优化建议也会较多。出于飞行安全的考虑,制定初始维修大纲时通常比较保守,因此首次 ISMO 优化的效果也最显著。ISMO 优化流程的目的是减少维修工作量、提高飞机可用度和降低维修成本,但前提是不能降低原来的安全性和可靠性指标。

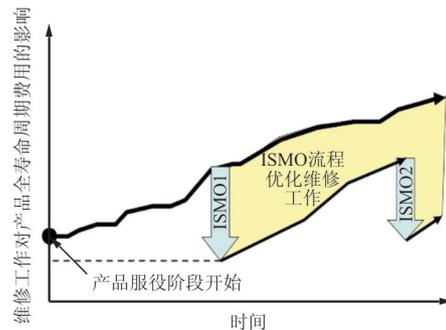


图 3 优化维修工作示意图
Fig. 3 Maintenance work optimization

2.1 数据预处理

开展数据分析之前需要收集所有预防性维修任务及其相关数据,预防性维修任务范围包括主机

单位提供的维修大纲和其他来源的预防性维修任务(如相关的技术通报),以便后期分析过程中的合并和删减。预防性维修任务相关的数据包括制定维修任务时的分析数据、服役期间的使用数据和维修数据以及主机单位和成品单位最新的试验结论数据等,数据收集完成后形成主任务清单(Master Task List,简称 MTL)。需要注意的是,军用飞机存在加改装、技术状态变更和使用环境差异较大的情况,因此应做好维修任务适用性和有效性的标识,防止分析过程中因相似数据的混淆而影响分析结果。

ISMO 优化流程并未强制要求维修大纲的制定过程中使用 S4000P 的分析方法,但要求对预防性维修任务制定时采用的分析程序进行审查,主要审查其先进性和完备性。针对原分析程序有明显改进的情况,建议按照新的分析程序重新分析生成维修任务;针对预防性维修任务的制定无充足的理论依据作支撑的情况,需要做补充分析,分析程序可采用与其他维修任务相同的分析逻辑或重新定义。补充分析得到的维修任务集成到 MTL 中之前,需要与原任务各要素(包括功能故障影响类别和维修间隔等)进行对比,识别并记录差异,供下一阶段详细分析,如图 4 所示。

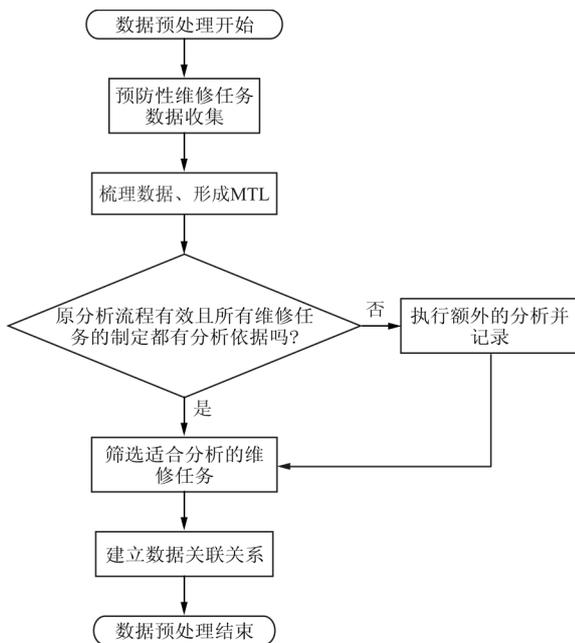


图 4 数据预处理流程图

Fig. 4 Data preprocessing flow chart

在 MTL 中,并非所有的维修任务都适合进入数据分析阶段,需要制定维修任务的筛选原则,并据此筛选出维修任务优化分析候选项。本文针对军用飞机制定了四项筛选原则:

(1) 已不适用飞机构型的维修任务

由于飞机构型的改变或检查手段的改进等原因,原维修任务已不适用于当前飞机,该类任务及相关数据应剔除;对于只适用于极少数飞机的维修任务,若其服役期间累积的经验数据过少,也无法作为候选项开展分析。

(2) 未达到阈值值的维修任务

部分维修任务的阈值较高,开展预防性维修任务优化时可能尚未执行过该维修任务,由于缺少服役期间维修数据,无法作为候选项开展分析(有补充试验数据的除外)。

(3) 维修任务包的拆分

维修任务优化分析是针对单项维修任务分别开展的,因此为了提高分析结果的准确性,应将初始组合的维修任务包还原为多个单项任务。

(4) 指令性的维修任务

对于有关法律法规规定的和机关单位要求的强制执行的维修任务,无法通过本优化流程进行调整,因此不作为分析候选项,但需审查维修任务与最新规定的符合性。

将筛选后的所有维修任务相关数据以每项维修任务为主键建立关联关系,即可作为数据分析阶段的数据输入,数据预处理的所有判断和决策均需记录,并形成总结报告,以便必要时的数据追溯。

2.2 数据分析

数据分析阶段是 ISMO 优化流程的核心内容,需要大量的数据分析和工程经验支撑分析流程中的各个决断。该阶段将所有预防性维修任务分为五个类别,对数据预处理形成的任务清单中每个任务及其相关数据进行分析,最终给出优化建议和结论。

2.2.1 维修任务适用性分析

维修任务优化分析开始时,首先分析其相关数据的完备性,以保证分析工作顺利开展,其中维修任务的功能故障影响类别(Functional Failure

Effect Category,简称 FFEC)的确定必不可少,若缺失,则需要分析人员依据相关分析流程(如图 5 所示)给出结论;然后对维修任务是否适合进行进一步优化分析进行判断:

- (1) 是否可缓解维修对象的性能衰退;
- (2) 维修任务在技术上能否实现;
- (3) 是否可被其他维修任务覆盖;
- (4) 其他帮助分析人员做出判断的问题。

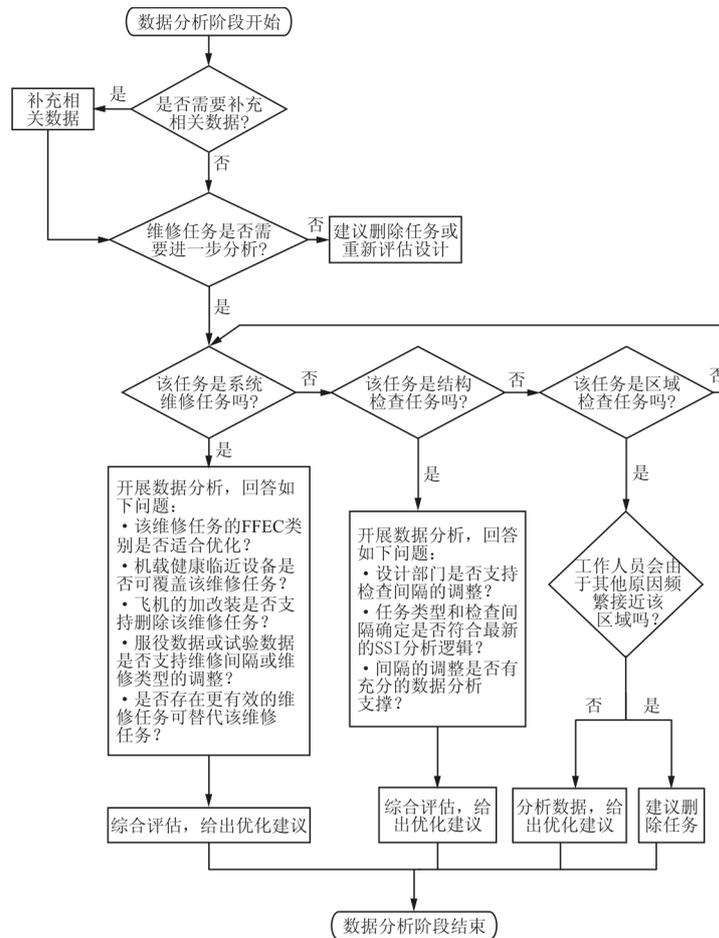


图 5 数据分析流程图

Fig. 5 Data analysis flow chart

综合以上问题的回答,需要进一步分析维修任务进入下一步骤,针对其他维修任务可以提出删除任务或重新评估设计的建议。

2.2.2 系统维修任务分析

该优化分析流程将系统维修任务分为勤务,检查或操作测试,定期更换或翻修三个类型。对每项系统维修任务相关数据进行分析后回答如下问题:

- (1) 该维修任务的 FFEC 类别是否适合优化;
- (2) 机载健康监控设备是否可覆盖该维修

任务;

- (3) 飞机的加改装是否支持删除该维修任务;
- (4) 服役数据或试验数据是否支持维修间隔或维修类型的调整;
- (5) 是否存在更有效的维修任务可替代该维修任务。

综合以上问题的回答和数据分析结果,给出系统维修任务的优化建议,FFEC 类别划分如图 6 所示。

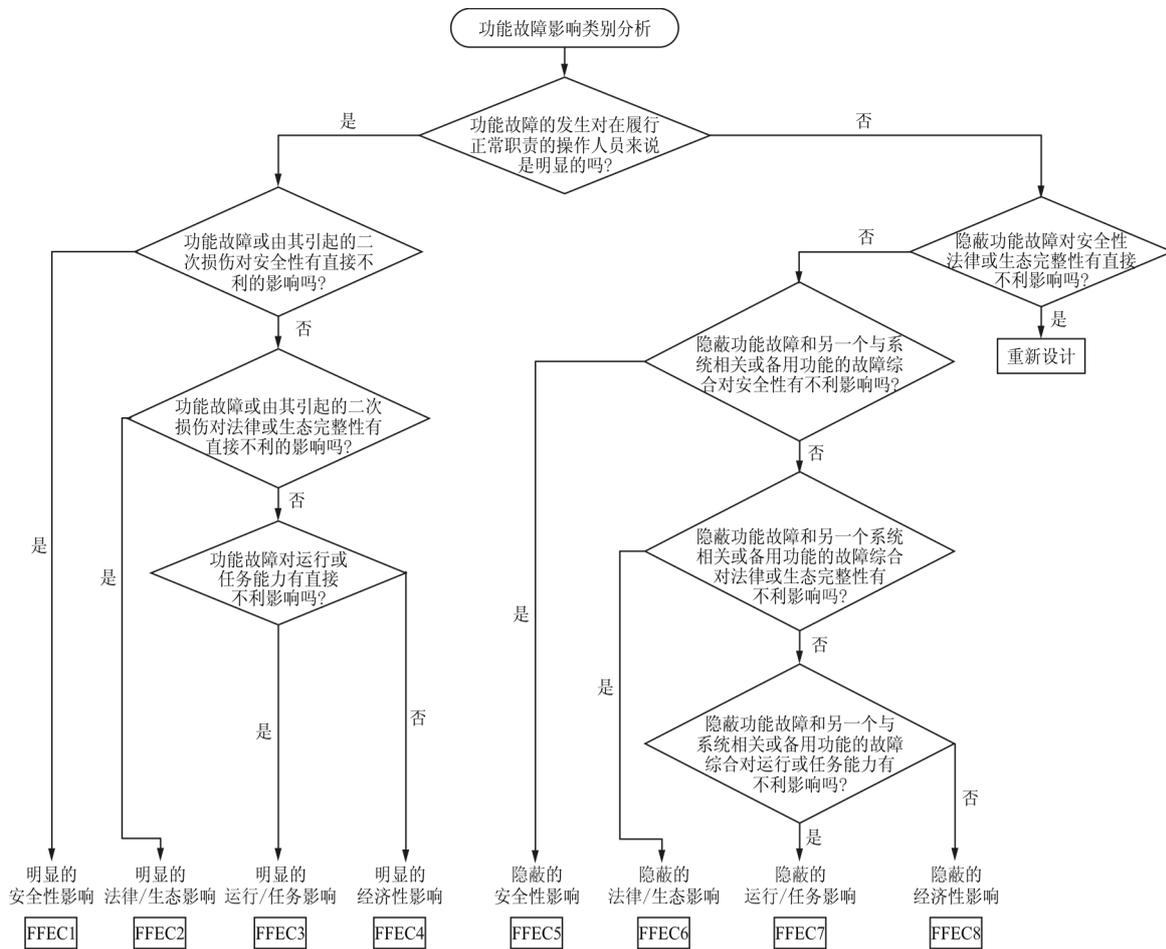


图 6 FFEC 类别划分

Fig. 6 FFEC classification

2.2.3 结构检查任务分析

重要结构项目 (Significant Structure Item, 简称 SSI) 的检查任务包括对不同材料部件的检查, 每项结构维修任务相关数据进行分析后应回答如下问题:

- (1) 设计部门是否支持检查间隔的调整;
- (2) 任务类型和检查间隔确定是否符合最新的 SSI 分析逻辑;
- (3) 间隔的调整是否有充分的数据分析支撑。

有些疲劳试验在飞机交付阶段未给出最终结论, 而且尚未积累足够的服役数据, 但主机单位最新的试验数据可以为间隔的调整提供佐证。综合以上问题的回答和数据分析结果, 给出结构维修任务的优化建议。

2.2.4 区域检查任务分析

区域检查任务分析主要考虑该任务区域内的

接近频率, 如果维修人员由于非计划维修任务频繁接近该区域, 则对该区域的检查任务可以删除, 但要确保该区域内不需要进行额外的拆装操作, 而且要满足非计划维修接近该区域的最低频率。

经过对勤务、检查或操作测试、定期更换或翻修、SSI 检查和区域检查五类预防性维修任务相关数据的分析和决断, 得到各维修任务优化分析建议, 在 MTL 中记录优化建议和分析过程以便数据追溯。

2.3 有效性监控

科学合理的预防性维修任务可以有效降低飞机故障率, 减少非计划维修工作。

然而, 制定飞机初始预防性维修任务的许多假设与服役阶段的实际状况存在一定差异, 因此需要持续监控和分析服役期间的使用数据和维修数据,

验证预防性维修任务对飞机故障的覆盖和控制。当服役过程中非计划维修活动明显超出设计开发阶段的预计时,分析人员应判断是否存在一项或多项预防性维修任务可能对该类故障适用且有效,依据预防性维修任务分析流程开展详细分析,提出新增维修任务的建议;否则,对影响任务执行或有严重影响全寿命周期费用的故障提出设计改进的建议。

3 结 论

(1) 本文在深入研究 S4000P 的基础上,以 ISMO 流程框架为基础,结合军用飞机的特点,构建了预防性维修任务优化的逻辑流程,分别解析了数据预处理、数据分析和有效性监控的工作内容,可用于军用飞机预防性维修任务的优化分析。

(2) 预防性维修任务的优化是一个持续过程,应依据飞机技术状态的变化、检测手段的改进、分析方法的调整等因素不断地迭代,从而使飞机的预防性维修任务一直处于最优状态。

参考文献

- [1] 洪晟,陶文辉,路君里,等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 862-864,868.
HONG Sheng, TAO Wenhui, LU Junli, et al. Maintenance and supportability of the missile weapon systems based on prognostic and health management[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(4): 862-864,868. (in Chinese)
- [2] REGATTIERI A, GIAZZI A, GAMBERI M, et al. An innovative method to optimize the maintenance policies in an aircraft: general framework and case study[J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 44: 8-20.
- [3] STADNICKA D, ARKHIPOV D, BATTAÏA O, et al. Skills management in the optimization of aircraft maintenance processes[J]. IFAC, 2017, 50(1): 6912-6917.
- [4] 张节,廖家锋,万宇. 军机维修任务优化方法及其应用[J]. 测控技术, 2019, 38(5): 40-43.
ZHANG Jie, LIAO Jiafeng, WAN Yu. Maintenance task optimization method of military aircraft and its applications [J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(5): 40-43. (in Chinese)
- [5] 刘成,王勇,蒋庆喜,等. 应用 S4000P 制订民用飞机区域检查任务方法探究[J]. 航空维修与工程, 2016(5): 59-61.
LIU Cheng, WANG Yong, JIANG Qingxi, et al. Method research on application of S4000P to civil aircraft zonal inspection tasks formulation[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2016(5): 59-61. (in Chinese)
- [6] 朱兴动,张琦,宋建华. 基于 S 系列标准体系的装备综合保障信息数据闭环研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 110-113.
ZHU Xingdong, ZHANG Qi, SONG Jianhua. Interaction and data closed-loop research on equipment integrated support information based on S-series integrated guarantee standard system[J]. Journal of Weapon Equipment Engineering, 2018, 39(6): 110-113. (in Chinese)
- [7] 安迪森. 不完全预防维修的维修任务间隔优化方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
AN Disen. Research on interval optimization method for imperfect preventive maintenance task[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)
- [8] 蔡景,左洪福,刘明,等. 复杂系统集成组维修策略优化模型研究[J]. 应用科学学报, 2006(5): 533-537.
CAJ Jing, ZUO Hongfu, LIU Ming, et al. Optimal group preventive maintenance model for complex systems [J]. Journal of Applied Science, 2006(5): 533-537. (in Chinese)
- [9] 蔡景,王华伟. 基于不完备检测的飞机结构维修优化方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(4): 481-485.
CAI Jing, WANG Huawei. Optimal maintenance of aircraft structure based on imperfect inspection[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(4): 481-485. (in Chinese)
- [10] 贾宝惠,刘涛,杨杭,等. 民机隐蔽故障维修间隔优化方法研究[J]. 航空制造技术, 2015(s1): 20-23,32.
JIA Baohui, LIU Tao, YANG Hang, et al. Study on maintenance interval optimization of hidden failure of civil aircraft[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2015(s1): 20-23,32. (in Chinese)
- [11] 林旭. 最佳维修间隔分析[J]. 黑龙江科技信息, 2010(4): 47-48.
LIN Xu. Analysis of the optimized maintenance interval [J]. Heilongjiang Science Information, 2010(4): 47-48. (in Chinese)
- [12] 周定国. 以可靠性管理优化飞机维修方案[J]. 航空维修与工程, 2008(5): 66-67.
ZHOU Dingguo. Optimization of aircraft maintenance plan with reliability management[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2008(5): 66-67. (in Chinese)
- [13] 许燕菲. 浅谈飞机维修方案的优化[J]. 航空维修与工程, 2004(5): 54-55.
XU Yanfei. Briefly introduction of optimization of aircraft maintenance schedule[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2004(5): 54-55. (in Chinese)
- [14] 张远. 调整和优化客户化维修方案[J]. 航空维修与工程, 2009(6): 88-89.
ZHANG Yuan. Adjust and optimize customized maintenance

- nance plan[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2009(6): 88-89. (in Chinese)
- [15] 门江. 维修方案项目优化的可靠性分析方法[J]. 航空维修与工程, 2016(9): 65-66.
MEN Jiang. Reliability analysis method of maintenance plan optimization[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2016(9): 65-66. (in Chinese)
- [16] 杨王锋. 军用飞机维修大纲修订流程研究[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 402-406.
YANG Wangfeng. Research on military aircraft maintenance program revision process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(4): 402-406. (in Chinese)
- [17] EASA. Clarification of IP44; IMRBPB IP116[S]. US: EASA, 2011.
- [18] EASA. Evolution/optimization guidelines; IMRBPB IP44 [S]. US: EASA, 2011.
- [19] ATA. Operator/manufacturer scheduled maintenance; MSG-3[S]. US: ATA, 2018.
- [20] 蒋庆喜, 危虹, 蒋海涛. 民用飞机维修大纲优化指南 IMRBPB IP44 及应用研究[J]. 航空标准化与质量, 2018(1): 42-44.
JIANG Qingxi, WEI Hong, JIANG Haitao. Introduction of guideline for MRBR evolution of civil aircraft-IMRBPB IP44[J]. Aviation Standardization and Quality, 2018(1): 42-44. (in Chinese)
- [21] RCM. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance: S4000P-B6865-04000-00[S]. US: RCM, 2018.

作者简介:

南雁飞(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程。

蒋庆喜(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程分析。

林 聪(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:可靠性评估、维修工程分析。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 576 页)

- [14] 航空工业沈飞民用飞机有限责任公司. 一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法: CN201510575578. 4[P]. 2013-04-03.
AVIC SAC Commercial Aircraft Company Limited. A method for computing aircraft system maintenance interval: CN201510575578. 4[P]. 2013-04-03. (in Chinese)
- [15] IMRBPB. Evolution/optimization guidelines IMRBPB issue paper 44(issue 3)[EB/OL]. [2020-03-26]. <http://www.deq.state.or.us/wq/tmdls/docs/midcoast/Advisory/20120717paper3.pdf>.

作者简介:

林 聪(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:可靠性评估、维修工程分析。

蒋庆喜(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程分析。

周 扬(1981—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:装备综合保障。

(编辑:丛艳娟)