

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-07

故障具有明显运行性影响的民用飞机维修任务优化方法

赖涛, 蔡景, ASSILA Achraf
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘要: 在民用飞机维修规划中, 基于 MSG-3 标准制定的民用飞机初始维修任务, 由于缺乏使用数据支持, 初步维修间隔设定偏于保守, 在实践中存在过度维修、经济性差等问题。在 IP44 指导思想下, 借鉴波音计划维修优化的统计分析(SASMO)的优化流程, 提出基于故障具有明显运行性影响的民用飞机维修任务优化方法。首先, 由故障影响类别梳理明显运行性影响类故障的特点; 其次, 收集所有与该类别维修任务相关的计划维修数据和非计划维修数据; 然后, 建立维修事件链将多源维修数据融合为故障周期并进行统计分析, 拟合该维修项目的故障概率曲线; 最后, 根据工程分析及综合评估给出维修任务间隔的优化建议。结果表明: 本文提出的民用飞机维修任务优化方法能够减少停飞时间, 提高维护效率, 降低维护成本。

关键词: 明显运行性; 维修任务优化; 维修事件链; 多源数据融合; 故障概率曲线; 工程分析

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Optimization method for civil aircraft maintenance tasks with obvious operational effects of faults

LAI Tao, CAI Jing, ASSILA Achraf

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the maintenance planning of civil aircraft, the initial maintenance tasks based on the MSG-3 standard for civil aircraft are set conservatively due to the lack of usage data support, resulting in problems such as excessive maintenance and poor economy in practice. An optimization method for civil aircraft maintenance tasks based on the guidance of IP 44 and the optimization process of Boeing SASMO is proposed. Firstly, the characteristics of obvious operational impact faults based on their impact categories are sorted out. Secondly, all planned and unplanned maintenance data related to this category of maintenance tasks collected. Then, a maintenance event chain to fuse multi-source maintenance data into a failure cycle and conduct statistical analysis is established, and the failure probability curve of the maintenance project is fitted. Finally, the optimization suggestions for maintenance task intervals are given based on engineering analysis and comprehensive evaluation. The results show that the optimization method for civil aircraft maintenance tasks proposed in this paper can reduce the grounding time, improve the maintenance efficiency, and reduce the maintenance cost.

Key words: obviously operational; maintenance tasks optimization; maintenance event chain; multi-source data fusion; fault probability curve; engineering analysis

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 民航安全能力建设资金项目(2021-104)

通信作者: 蔡景(1976-), 男, 博士, 副教授。E-mail: caijing@nuaa.edu.cn

引用格式: 赖涛, 蔡景, ASSILA Achraf. 故障具有明显运行性影响的民用飞机维修任务优化方法[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-7.

LAI Tao, CAI Jing, ASSILA Achraf. Optimization method for civil aircraft maintenance tasks with obvious operational effects of faults[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-7. (in Chinese)

0 引言

在规划民用飞机维修大纲时,新研飞机的维修任务间隔因缺乏运行数据而过于保守,导致航空公司面临过度维修或维修不足的问题。过度维修增加了高昂的维修成本;而维修不足则影响飞机运行安全性和停场率,造成经济损失。据统计,飞机维修成本占我国航空公司运营总成本的比例高达 15%~30%,高于国外发达国家的 10% 左右^[1]。随着国内民用飞机交付量增加和维修数据的积累,优化维修任务变得迫切。在保障飞机安全运行的前提下,如何充分利用现有资源制定合理有效的飞机维修方案成为我国航空公司面临的重要问题。

在国际研究领域,维修任务优化主要遵循 MSG-3 标准,该标准强调基于风险和经验的维修决策过程^[2]。维修审查委员会(Maintenance Review Board,简称 MRB)的 IP44(Evolution/Optimization Guideline IP44)文件,进一步指导了民用飞机维修大纲的制定与优化^[3]。在国内,随着民用航空技术的发展,中国民航局发布了 AC-91-26 标准^[4]。这标志着中国在遵循国际适航标准的同时,也在不断推动本土民用航空技术的发展。然而,尽管有这些指导性文件和标准的存在,具体的实现方法仍需要进一步探索。

在维修任务间隔优化理论研究方面,国外研究者 WEIDE 等^[5]结合遗传算法和蒙特卡洛仿真优化飞机维修计划,这种方法可以显著减少维修检查次数和成本,同时提升维护计划的效率和稳健性;AHMADI A 等^[6]提出动态故障发现检查策略,该策略在考虑风险和老化效应的情况下,通过最佳化检查间隔和维修策略来优化维修任务;DENG Q C 等^[7]结合动态规划和混合前瞻调度策略,用于飞机维修检查计划的优化;Bluvband 等^[8]利用随机搜索算法探讨了基于预测健康管理和剩余使用寿命的复杂飞机系统维修优化问题。国内研究者如林聪等^[9]提出了一种包括数据样本量确定、故障趋势分析和假设检验准则的维修间隔优化方法;冯蕴雯等^[10]开发的基于运行数据的动态维修间隔优化方法,使用极大似然估计来拟合部件寿命分布,并结合飞行小时数和可靠度要求调整维修任务间隔;应舒琪^[11]采用数据映射方法转换维修数据为系统寿命数据,并建立可靠性模型

来确定最佳维修间隔;李景奎等^[12]使用改进的三参数威布尔极大似然估计法来分析部件可靠性数据,平衡可靠性和经济性以确定最优维修间隔;郑志霖等^[13]分析了航空公司如何优化维修方案,包括方法、可靠性监控和政策制定等方面。

国外民用飞机制造商波音和空客在飞机维修任务优化方面积累了丰富的经验,并开发了成熟的维修间隔优化方法。其中,波音的维修间隔确定和优化工具(Maintenance Interval Determination and Optimization Tool,简称 MIDOT)方法基于 MSG-3 分析结果和相似性判断,根据类似机型的维修数据并以可靠度为阈值确定新研机型的初始维修间隔;而计划维修优化的统计分析(SASMO)方法^[14]则根据航空公司的实际运行数据进行统计分析以优化长期维修计划,已获得多个适航当局的认可。

综上所述,维修任务优化理论与实践是一个涉及多学科交叉的领域,它包括算法应用、风险评估、实际运行数据分析、可靠性模型建立以及航空公司和制造商的经验。旨在降低航空公司运营成本、提高飞行效率和稳健性,同时确保飞机的安全性和可靠性。然而,由于商业竞争利益,国外的维修数据处理和维修优化可靠性模型建立细节并未公开;在国内民用飞机维修任务优化研究过程中,并没有对某一类维修任务优化进行详细探讨,主要针对部件失效时间进行统计分析以预测最佳维修间隔。但是,由于飞机系统及部件的并联性和复杂性,获取准确的失效时间变得困难。

因此,结合国内某航空公司的需求,将以维修任务为单位,针对第 6 类明显的运行性影响类故障,借鉴波音 SASMO 流程,提出一种维修任务优化方法,包括数据收集、数据分析和工程分析三个关键步骤。首先,收集目标航空公司的实际维修数据,并进行人工整理和分析;其次建立维修事件链,通过多源数据融合得到故障周期;然后,采用双参数威布尔分布建立维修任务优化模型,输出维修项目的重大故障和轻微故障的概率曲线;最后,经过工程分析,结合 MRB 及工业指导委员会(Industry Steering Committee,简称 ISC)相关规定制定维修任务优化建议。

1 维修任务概述

飞机维修项目的来源主要包括维修方案、适航当局批准、制造商提供的维修计划文件和航线维修。这些来源为飞机的维修工作提供了指导和依据,确保飞机的安全运行和持续适航性^[15]。

根据MSG-3维修思想,通过分析维修项目相应系统的功能、功能失效、失效影响和失效原因;再综合评估维修项目对飞机安全性、运行性和经济性的影响^[16];最终将故障影响类别分为第5类至第9类;这种分类帮助航空业确定维护任务的重要性和紧急性,以及制定相应的维护策略和程序,从而提高飞机的安全性、可靠性和经济效益。具体故障影响类别如图1所示。

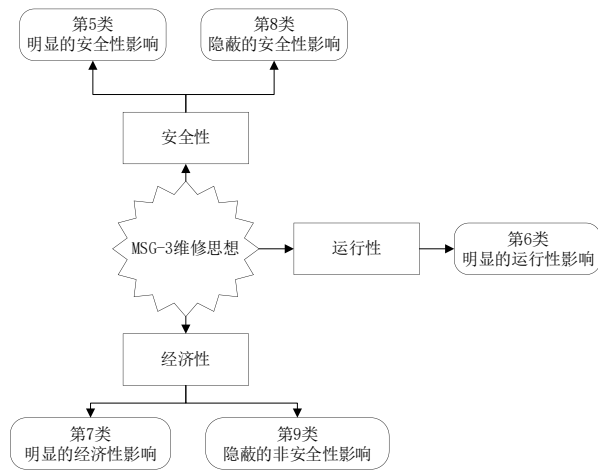


图1 故障影响类别
Fig. 1 Fault impact category

针对第6类明显的运行性影响类故障,其具有如下特征:故障的发生对机组成员来说是明显的;故障对飞机运行安全性没有直接的有害影响;功能失效对运行有直接的有害影响。目前国内航空公司针对这类故障的维护策略重点是通过定期检查来减少其发生,在维护审查委员会报告要求下,该类维修任务的间隔一般较短,以保持飞机的正常运行。

然而,对于航空公司而言,选择保守的维修间隔并非最佳策略。随着机队规模的扩大,过于频繁的维修不仅会增加成本,还可能导致运营效率降低和资源使用不当。针对第6类明显的运行性影响类故障,航空公司应基于飞机的实际使用情况和历史维修数据来灵活优化维修任务。以确保

飞机可以高效、准时地运行,同时保证乘客的舒适和满意度,实现运营的经济效益和服务质量的双重目标。

2 维修任务优化

针对故障具有明显运行性影响的维修任务,其维修间隔应根据影响飞机运行水平的严重程度来优化。按影响等级将系统故障分为轻微故障和重大故障两类。轻微故障通代指在定期检查中发现的与部件损坏或性能退化相关的潜在故障;而重大故障则代指因部件损坏或退化导致飞机无法正常运行的功能性故障。

为确保维修任务优化的效果,构建全面的可靠性管理系统,专注于机队使用数据的收集、处理和分析。基于这些数据的深入分析,对维修任务进行持续的优化,以确保其始终与实际运营状况保持同步。维修任务优化流程如图2所示。

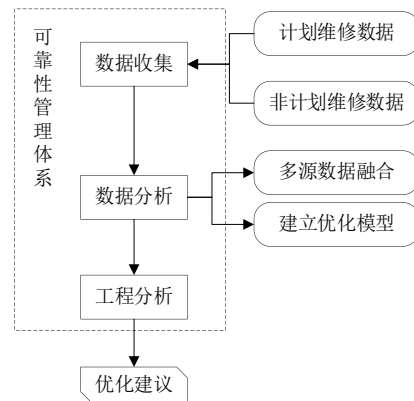


图2 维修任务优化流程
Fig. 2 Maintenance task optimization process

2.1 数据收集

在民用飞机维修任务优化的过程中,系统化的数据收集是关键步骤。包括计划性维修记录、历史非计划性维修记录、飞行操作数据、部件服役历程以及制造商和监管机构发布的相关数据。这些多源数据涵盖了结构化的量化数值和非结构化的描述性内容,为之后的维修策略制定提供了全面的信息基础。如波音计划维修优化的统计分析(SASMO)方法中使用在役数据程序(In-Service Data Program,简称ISDP)来收集飞机在服役期间的各种可靠性数据。这些数据包括但不限于飞行

小时、起降次数、维修记录等,以优化维修任务并提高飞机的整体可靠性。这种基于数据驱动的维修优化方法,不仅提升了飞机的运行效率,也为航空业的维护策略提供了新的视角。然而,国内航空公司尚未应用类似的数据收集系统,通常采用人工方式提取第6类影响类别维修项目中的航线维修和定期维修工卡数据。工卡详细记录了每项维修任务的具体内容和相关的故障信息,反映了飞机维护工作的常规性和计划外特性。例行工卡包含了细致的检查信息,而非例行工卡则记录了在常规检查中发现的系统损伤、缺陷或故障。

为了提高数据的可用性,需要对从航空公司收集到的机队维修数据进行分类整合,并统一数据格式和内容标准。尽管这种数据收集方式与IS-DP系统有所不同,但它依然保证了数据的可靠性和可行性。通过对不同来源的数据进行综合分析,可以为飞机维修任务优化提供有力的支持。

2.2 数据分析

1) 多源数据融合

针对第6类明显的运行性影响类故障,将相关维修任务的计划维修数据和非计划维修数据进行数据融合。包括数据连接、异常检测、清洗数据、建立维修事件链。该过程旨在创建一个完整、一致的维修历史数据集,以统计出系统的寿命数据。建立维修事件链的流程如图3所示。

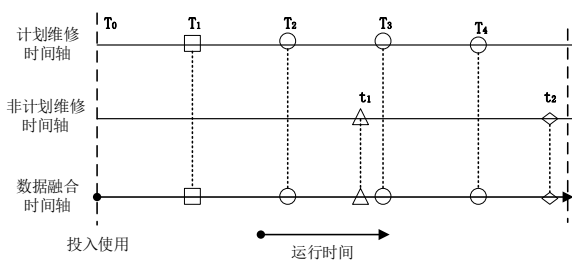


图3 维修事件链

Fig. 3 Maintenance event chain

在图3中,单架飞机的维修事件链可表示为:飞机从 T_0 时刻投入使用,在 T_1 时刻例行检查发现了系统的潜在故障;在 T_2 时刻例行检查没有发现故障;在 t_1 时刻系统出现功能故障,导致飞机运行中断;在 T_3 时刻例行检查没有发现故障;在 T_4 时刻例行检查没有发现故障;在飞机运行时间内, t_2 时刻系统出现功能故障并进行了故障部件拆换。在

计划维修时间轴上,根据例行工卡信息,可以知道 T_i 的具体值,单位为飞行小时或飞行循环(fh/fc);而在非计划维修时间轴上,根据非例行工卡信息,只能知道发生故障的具体日期及故障严重程度,无法知道 t_i 的具体飞行小时或飞行循环(fh/fc)。因此,需结合航空公司飞机日利用率、日平均飞行小时/飞行循环及相邻两次例行检查之间的平均飞行天数,由数据融合时间轴统计分析系统的故障周期。在民用飞机维修事件中,计划维修事件可融合为维修任务的区间删失数据与右删失数据;非计划维修事件可融合为维修任务的完全失效数据与右删失数据。数据融合结果如表1所示。

表1 数据融合结果
Table 1 Data fusion results

潜在故障周期	数据类型	功能故障周期	数据类型
(T_0, T_1)	区间删失	$(T_1 - T_0) +$	右删失
$(T_2 - T_1) +$	右删失	$(T_2 - T_0) +$	右删失
$(T_2 - T_1, t_1 - T_1)$	区间删失	$t_1 - T_0$	完全失效
$(T_4 - t_1) +$	右删失	$(T_4 - t_1) +$	右删失
$(T_4 - t_1, t_2 - t_1)$	区间删失	$t_2 - t_1$	完全失效

2) 建立维修任务优化模型

航空产品涉及的系统种类繁多,确定维修任务间隔需要分析系统的失效规律和寿命分布。在民航工程领域,由于故障率变化类型多且系统可靠性高,导致失效数据样本数量较少。因此,通常选择威布尔分布来表示系统的失效情况,特别是对于小样本数据,威布尔分布具有较好的拟合效果。威布尔分布又包括双参数威布尔分布和三参数威布尔分布,由于实际工作中,位置参数对系统寿命分析的影响较小,可忽略其影响,所以通常采用两参数威布尔分布。其概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中: β, η 分别为形状参数和尺度参数。

两参数威布尔分布的失效分布函数为

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

对失效分布函数参数进行估计,即可建立维修项目的可靠性模型。根据数据融合结果,发现故障周期多数为删失数据。在面对数据严重删

失、且仅有少量完整失效数据的情况下,极大似然估计法成为了更为理想的选择。该方法优势在于它能够充分利用整个数据集的信息进行参数估计,而不会忽视删失值信息。这是极大似然估计法的显著特点,使得其估计结果不仅更精确,而且拥有更小的方差^[17]。含有删失数据的两参数威布尔分布的极大似然函数为

$$\ln L = \sum_{i=1}^M \ln \left\{ \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T_i}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left[\left(\frac{T_i}{\eta} \right)^\beta \right]} \right\} - \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i}{\eta} \right)^\beta + \sum_{i=1}^Q \ln \left\{ e^{-\left[\left(\frac{T_{Li}}{\eta} \right)^\beta \right]} - e^{-\left[\left(\frac{T_{Ri}}{\eta} \right)^\beta \right]} \right\} \quad (3)$$

式中: M 为完全失效数据的个数,记为 T_i ; N 为右删失数据的个数,记为 T_i' ; Q 为区间删失数据的个数,区间左端点记为 T_{Li} ,右端点记为 T_{Ri} 。

对参数 β 和参数 η 分别进行求导,令 $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = 0, \frac{\partial \ln L}{\partial \eta} = 0$,求解即可得到参数的极大似然估计值,从而建立基于威布尔分布的维修任务优化模型。

2.3 工程分析

基于上述数据分析开展对维修任务的工程分析,通过对系统可靠性评估后给出维修间隔优化建议。根据多源数据融合的结果,将潜在故障周期作为轻微故障分布的输入,将功能故障周期作为重大故障分布的输入。分别建立双参数威布尔分布模型并拟合对应故障周期的概率曲线,如图3所示。

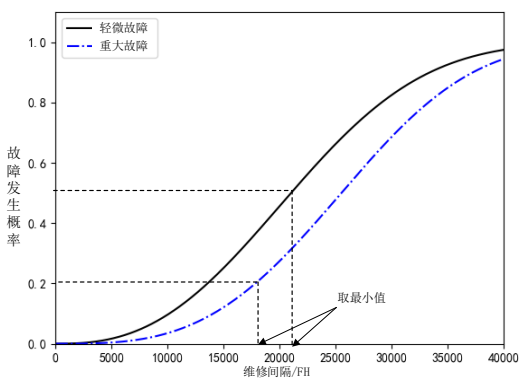


图3 故障分布曲线示例图

Fig. 3 example diagram of fault distribution curve

参考故障分布曲线,严格遵从MRB及ISC相关规定^[13]。根据MRB的规定:在第6类故障影响类别中,轻微故障的发生率不得超过50%,而重大故障的发生率上限定为20%。同时,ISC的指导原则明确:对于第6类别维修任务间隔的调整最多延长至原间隔的三倍。

在此基础上,结合飞机的利用率、不同类别检查间隔及航空公司维修部门管理等因素进行综合评估,最终提出维修任务优化建议。由工程分析的结果可提出关于维修任务优化的以下建议:增加维修任务间隔,保持维修任务间隔,缩短维修任务间隔。

3 实例分析

针对国内某航空公司波音737NG系列机队、维修任务号为27-011-00-01的维修任务,其相关参数如表2所示。

表2 维修任务参数
Table 2 Maintenance project parameters

故障影响类别	任务描述	任务目的	初始维修间隔/h
6	一般目视检查副翼机械部件	排除副翼机械控制路径故障 减少横向控制冗余 增加驾驶盘操作力。	8 000

针对该维修任务,根据维修工卡单及最低设备清单(Minimum Equipment List,简称MEL),将该项目的轻微故障定义为例行检查中发现的由于轮舱内或副翼接口处副翼机械控制路径部件损坏或退化有关的潜在故障;重大故障定义为由于轮舱内或副翼接口处机械控制路径部件损坏或退化而导致飞机运行中断的功能故障。通过对261架飞机近8年维修数据进行采集、整理和分析,统计得到维修数据702条,包括698条定期维修数据和4条航线维修数据(包括系统部件拆换),发生不安全事件的次数为0。在该机队698条定期维修中,仅出现8次潜在故障;而4次航线维修均为功能故障。在收集到的数据集中,故障占比仅为2%左右。这表示当前维修任务间隔较短,存在过度维修的情况,使得航空公司维修成本上升,造成了维修经济性差等问题。维修项目分析结果如图4所示。

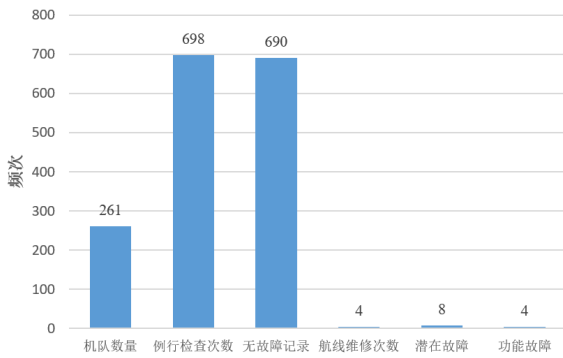


图4 维修项目分析

Fig. 4 Maintenance project analysis

建立机队维修事件链,对收集到的维修数据进行多源数据融合处理。将维修记录转换为系统的故障周期,通过分析得到101个潜在故障周期和78个功能故障周期,具体结果如表3所示。

表3 故障周期
Table 3 Fault cycle

潜在故障周期/fh	数据类型	频次	功能故障周期/fh	数据类型	频次
9 600+	右删失	3	9 600	右删失	3
(8 000,16 000)	区间删失	2	11 270	完全失效	1
14 400+	右删失	8	14 400+	右删失	6
16 000+	右删失	29	16 000+	右删失	24
(14 400,19 200)	区间删失	2	17 620	完全失效	1
(16 000,24 000)	区间删失	3	19 200+	右删失	15
19 200+	右删失	20	21 200	完全失效	1
(19 200,24 000)	区间删失	1	23 150	完全失效	1
24 000+	右删失	22	24 000+	右删失	12
32 000+	右删失	11	32 000+	右删失	14

采用双参数威布尔分布模型,将潜在故障周期作为输入拟合轻微故障的概率曲线,将功能故障周期作为输入拟合重大故障的概率曲线。经极大似然估计法求解形状和尺度参数,计算得出该项目的重大故障概率分布函数为 $F(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{28\,625.3}\right)^{1.1685}}$,轻微故障概率分布函数为 $F(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{24\,203.6}\right)^{1.5872}}$ 。故障分布概率曲线如图5所示。

参考故障分布曲线,并侧重于重大故障的分布函数来决策维修间隔。根据MRB的规定,明显运行性故障类维修项目的重大故障发生率上限是20%。然而,由于缺乏专业维修工程组的分析和方法有效性验证,初期保守起见,将重大故障发生率的上限设定为10%,在这个条件下,计算得出的维修间隔是16 683 fh。进一步的调查显示,对于该

航空公司,一个A检周期大约是800 fh,任务27-011-00-01的维修间隔为10A。结合MBR及ISC规定、航空公司A检间隔、维修人员调度等因素综合评估后,提出如下优化建议:将任务号为27-011-00-01的维修任务间隔从8 000 fh延长至16 000 fh,即20A。维修任务优化后,航空公司此类维修任务的单机例行维修次数在全寿命周期内将会减少至原来的一半;可以有效解决过度维修的情况,使得维修活动更符合高效维修及飞机高利用率等实际需求。随着机队规模扩大、飞机利用率上升,维修任务优化后航空公司经济效益会显著提高。

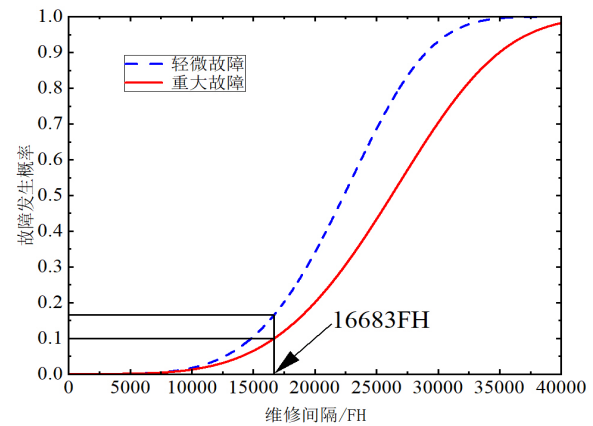


图5 故障分布曲线

Fig. 5 Fault distribution curve

在相同机型的同级维修项目中,国内某航空公司已成功完成相关维修任务优化。2018年,波音公司为该航空公司的波音737NG飞机进行了维修方案优化。针对维修项目27-003:从左或右大翼副翼的控制单元到副翼和扰流板机械控制路径之间的副翼机械部件进行一般目视检查。基于对189架飞机近十年的维修数据的收集、整理和分析,参考SASMO系统提供的故障概率曲线,综合分析后波音公司决定将该维修任务的间隔从原来的8 000 fh延长至17 500 fh。此维修任务优化方案通过了民航局和和华东地区管理局的评审。

4 结 论

1) 随着民用航空业迅猛发展,优化飞机维修任务成为维护航空安全和提高运营效率的关键环节。特别是对于那些具有明显运行性影响的故障,维修任务的优化不仅涉及安全性,还直接关联

到航空公司的经济效益和服务品质,具有重要的理论和实践意义。

2) 以维修任务为单位优化维修间隔具有综合性维护考虑的优势。这种方法全面整合多个部件的维护需求,减少停飞时间,提高维护效率,降低维护成本。从而更有效地管理飞机的整体性能,减少不必要的维修次数,同时更灵活地适应不同的运营环境,为航空公司提供更经济、可靠的运营方案。

3) 针对具有明显运行性影响的故障,维修任务的优化应根据影响飞机运行水平的严重程度进行。在维修任务优化过程中,必须在确保飞行安全和提高维修效率之间找到平衡点,切实执行 MBR、ISC 及民航局相关规定,以保障飞行安全和提升维修效率。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2022 年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2023.
Civil Aviation Administration of China. Statistical Bulletin on the Development of the Civil Aviation Industry in 2022 [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2023. (in Chinese)
- [2] International Maintenance Review Board Policy Board. Aircraft Health Management (AHM) integration in MSG-3 [S]. US: International Maintenance Review Board Policy Board, 2018.
- [3] International Maintenance Review Board Policy Board. Evolution/optimization guidelines IMRBPB issue paper 44 (Issue 3) [S]. Krohne: European Aviation safety Agency, 2011.
- [4] 中国民用航空局. 航空器计划维修要求的编制: AC-91-26 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2015.
Civil Aviation Administration of China. Preparation of aircraft planned maintenance requirements: AC-91-26 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015. (in Chinese)
- [5] WEIDE T V D, DENG Q C, STANTOS B F. Robust longterm aircraft heavy maintenance check scheduling optimization under uncertainty [J]. Computers & Operations Research, 2022, 14: 105667.
- [6] AHMADI A, KUMARU. Cost based risk analysis to identify inspection and restoration intervals of hidden failures subject to aging [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60 (1): 197-209.
- [7] DENG Q C, BRUNO F S. Lookahead approximate dynamic programming for stochastic aircraft maintenance check scheduling optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 299(3): 814-833.
- [8] ZIGMUND B, SERGEY P, LIN Y. Replacement interval optimization for aircraft maintenance [C]// 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Palm Harbor: IEEE, 2015: 1-7.
- [9] 林聪, 蒋庆喜, 周扬. 基于服役数据的飞机计划维修任务间隔优化方法 [J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 572-576, 584.
LIN Cong, JIANG Qingxi, ZHOU Yang. Optimization method for aircraft planned maintenance task interval based on service data [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 572-576, 584. (in Chinese)
- [10] 冯蕴雯, 潘维煌, 路成, 等. 基于运行数据的国产民机动态维修任务间隔优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (4): 1231-1238.
FENG Yunwen, PAN Weihuang, LU Cheng, et al. Optimization of dynamic maintenance task intervals for domestic civil aircraft based on operational data [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2023, 45(4): 1231-1238. (in Chinese)
- [11] 应舒琪. 基于可靠性数据的民机维修间隔优化方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
YING Shuqi. Research on optimization method for maintenance intervals of civil aircraft based on reliability data [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [12] 李景奎, 蔺瑞管, 段飞飞, 等. 民机系统部件维修间隔优化 [J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 90-94.
LI Jingkui, LIN Ruiguan, DUAN Feifei, et al. Optimization of maintenance intervals for civil aircraft system components [J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2019, 17(1): 90-94. (in Chinese)
- [13] 郑志霖, 叶晓东. 基于统计分析方法的飞机维修方案优化 [J]. 航空维修与工程, 2020(11): 29-33.
ZHENG Zhilin, YE Xiaodong. Optimization of aircraft maintenance plans based on statistical analysis methods [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2020(11): 29-33. (in Chinese)
- [14] PRILL D, KRANZER S, MERZ R. Improving maintenance processes with data science [M]// Haber P, Lampoltschammer T, Mayr M. Data science: analytics and applications. Berlin: Springer, 2021.
- [15] 何瑞, 赵飞. 综合型飞机维修方案优化实践研究 [J]. 航空维修与工程, 2023(1): 26-29.
HE Rui, ZHAO Fei. Practical study on optimization of comprehensive aircraft maintenance plans [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2023(1): 26-29. (in Chinese)
- [16] 孙滨, 梁刚, 谈云峰. MSG-3 在民用航空器维修大纲制定中的应用 [J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 259-264.
SUN Bin, LIANG Gang, TAN Yunfeng. The application of MSG-3 in the development of civil aircraft maintenance program [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(2): 259-264. (in Chinese)
- [17] 蒋仁言, 刘超. 基于田口可靠性试验的截尾数据处理方法 [J]. 长沙: 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 1-9.
JIANG Renyan, LIU Chao. A truncated data processing method based on Taguchi reliability test [J]. Journal of Changsha University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 20(2): 1-9. (in Chinese)

(编辑: 丛艳娟)