



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402782

引用格式:李耀华,郭雅妮.考虑多因素综合风险影响的民机系统部件机会维修决策优化方法[J].科学技术与工程,2025,25(6):2595-2604.

Li Yaohua, Guo Yani. Optimization method for opportunity maintenance decision of civil aircraft system components considering the comprehensive risk effects of multiple factors[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2595-2604.

航空、航天

考虑多因素综合风险影响的民机系统部件 机会维修决策优化方法

李耀华, 郭雅妮*

(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要 针对民机维修中对系统部件风险影响分析不够深入、分类管理不细而导致部件运行中出现突发故障的问题,通过引入综合风险影响度因子对民机系统部件的重要度和潜在隐患进行准确评估,建立了考虑多因素综合风险影响的部件预防性维修策略。以民机系统部件维修成本优化为目标,建立了一种考虑部件多因素综合风险影响的民机系统机会维修决策模型,综合考虑了系统部件间的时间相关性和部件的多因素综合风险影响产生的成本。实例验证表明,相较于不考虑部件风险影响的预防性维修决策,本文提出的维修决策使民机系统的总维护成本降低约 20.20%,预防性维修与更换次数减少率约为 41.23%。

关键词 部件重要度; 部件潜在隐患; 预防性维修; 机会维修

中图分类号 V267; 文献标志码 A

Optimization Method for Opportunity Maintenance Decision of Civil Aircraft System Components Considering the Comprehensive Risk Effects of Multiple Factors

LI Yao-hua, GUO Ya-ni*

(School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] In response to the problem of insufficient analysis of the risk impact on system components and inadequate classification management in civil aircraft maintenance, which leads to sudden failures during component operation, a comprehensive risk impact factor was introduced to accurately evaluate the importance and potential hazards of civil aircraft system components, and a component preventive maintenance strategy considering the comprehensive risk impact of multiple factors was established. A chance maintenance decision model for civil aircraft systems was established with the objective of optimizing the maintenance cost of components, taking into account the comprehensive risk impact of multiple factors on components. The model comprehensively considers the time correlation between system components and the cost generated by the comprehensive risk impact of multiple factors on components. Example verification shows that compared to preventive maintenance decisions that do not consider the impact of component risks, the maintenance decision proposed in this article reduces the total maintenance cost of civil aircraft systems by about 20.20%, and the reduction rate of preventive maintenance and replacement frequency is about 41.23%.

[Keywords] component importance; potential hazards of components; preventive maintenance; opportunity maintenance

近年来,随着民航的快速发展,机队规模逐渐增大,民航运输量逐步增加,民机系统运行中部件应对潜在的风险因素的分析已成为必须重视的问题。民机系统部件作为民机系统的关键组成部分,系统部件出现故障将导致较大的停机损失和社会

影响。因此,高风险部件正常工作对于民机系统安全稳定的运行极其关键。综合部件的重要度和潜在隐患影响程度,准确评估部件风险来提高民机运行的可靠性,对降低系统运行风险有很大帮助。对于风险较高的部件,提高维护水平和管理程度,来

收稿日期:2024-04-17; 修订日期:2024-12-12

基金项目:国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金重点支持项目(U2033209)

第一作者:李耀华(1974—),男,汉族,天津人,博士,教授。研究方向:民机系统维修决策优化,维修工程分析。E-mail:yh_li@cauc.edu.cn。

*通信作者:郭雅妮(2000—),女,汉族,新疆阿克苏人,硕士研究生。研究方向:民机系统维修决策优化。E-mail:2122196086@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

保持其运行的可靠性,降低部件发生突发故障的概率。

为民机系统制定合理的维修策略可以有效地提高其可靠性和使用寿命,并且降低维护成本。现如今,对于复杂的民机系统部件的维护策略,一种是将复杂系统看作一个整体进行维修,即纠正性维护(corrective maintenance, CM)^[1]、基于时间的预防性维护(scheduled maintenance, SM)^[2]和状态维护(condition based maintenance, CBM)^[3]。另一种是将复杂系统看作多部件系统,对其进行选择性维修、成组维修和机会维修等。在实际系统中,复杂的民机系统一般是由多个部件共同组成,且具有复杂的相关性^[4-5],如经济相关性、结构相关性、随机相关性等。部件级维修决策是制定系统级机会维修决策的基础,这对维修策略有很大的影响。预防性维修次数越多会导致维护效果逐渐减弱,将单部件的维修策略应用于民机系统可能会使得过度维修或维修不足^[6],因此,许多预防性维修模型都把预防性维修次数作为优化的决策变量,尽量减少周期内维修总次数使得维护效果更好^[7],文献[8]基于特征协变量计算得最优预防性维修间隔并建立了柴油发动机的视情维修决策;文献[9]基于可靠性衰退趋势模型并以可靠性和成本为目标提出了多组件预防性维修策略多目标优化模型。近几年,机会维修策略在民机系统中得到了更广泛的关注;文献[10]基于不完美维修策略建立了机会维修模型,同时确定了不同单元数控机床的机会维修的时间阈值;文献[11]针对多单元冗余系统的动态机会维修策略,利用改进的带记忆的遗传算法计算得到最优机会维修计划;文献[12]提出了基于条件的机会维修;文献[13]研究了多部件系统基于状态的机会维修策略,并为涡轮机系统建立了备件供应联合优化策略,后来许多学者从不同方向对其进行了改进^[14-17]。但是在建立机会维修决策优化模型时,很少有在部件级维修决策中考虑部件风险影响的模型,以往建立的模型大都仅考虑了部件发生故障的停机损失和直接维修损失^[18],却没有考虑部件的风险影响损失,对于民机这种安全责任重大、故障影响后果严重的大型运输设备,考虑部件风险影响是为民机系统部件制定维修决策的重要内容,因此,检测风险影响是优化机会维修模型需要考虑的核心因素。对于民机系统部件的风险影响的评估,如文献[19]对运用概率风险分析对发动机系统进行了故障风险评估;文献[20]在不完美维修决策中引入故障风险因子,采用层次分析法和评分法将部件的故障风险进行量化;文献[21]构建了考虑双指标

的设备风险影响度指标模型,将部件按照对系统可靠性和稳定性不同的影响度进行等级分类。对民机系统风险影响损失的评估实施更深入的分析,这样能够得到更加合理全面的部件风险影响损失的结果,为民机系统维护提供可靠的数据支持。

以往预防性机会维修决策中没有考虑部件的风险影响而进行区别备件,导致备件成本过高,总维护成本提升,现针对民机系统部件运行期间发生非预期故障可能对系统造成不同后果的风险,引入部件综合风险影响度因子对其进行量化分析,得到不同部件各自的综合风险影响度因子,再计算得出风险影响损失成本,以预防性维修可靠度阈值为决策变量,总成本为优化目标,建立一种考虑风险影响损失的民机部件维护决策模型,在此基础上为多部件串联系统制定考虑机会维修的系统维修决策。以降低民机全运行周期中整体维护成本,对制定更符合航空企业需求的民机系统维修决策有指导性意义。

1 综合风险影响度因子的建立

民机系统是一种极其精密的复杂集成系统,在民机运行期间,导致系统部件风险影响损失产生的因素有许多,并且民机系统不同的部件的功能和重要度也存在区别,同时部件发生故障导致系统产生的后果也不同。

本文研究通过分析民机系统部件故障原因和运行经验^[22],总结分类了多层次、隐性的部件风险影响因素,运用部件综合风险影响评估计算模型,如图1所示,从民机系统部件的重要度和潜在隐患两个方面来评估部件预警或故障对系统造成的影响,对不同民机系统部件的风险影响损失影响进行评价分级,其中,部件综合风险影响度表示影响的严重程度,然后将其量化为部件的风险影响损失成本计算进总维修费用,全面权衡部件故障对民机正常工作的影响,并对采购备件的种类与数量进行合理决策,避免其他模型中仅考虑部件故障停机损失和维修成本却不考虑部件故障导致的其他危害的疏漏,同时降低航空公司冗余的备件管理成本。

对于综合风险影响度高的部件,航空公司在备件采购时会优先保证其有更充足的储备量,以便于在需要时及时更换来保障运行的连续性,因此可以节省更换部件时再去采购部件所需的人力资源与供应短缺所导致的停机损失等成本和供应加急成本;如果购置过多风险影响损失影响度低的备件,冗余的备件储备费用会占用航空公司大量资金,会对航空公司的经济效益产生影响,因此航空公司需要对采购备件的种类与数量进行合理的决策。

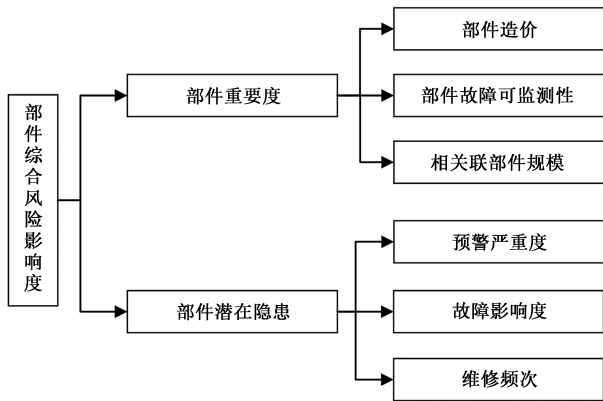


图1 部件综合风险影响度评估因素

Fig. 1 Factors for evaluating the comprehensive risk impact of components

由于恰当的备件库存管理,民机系统部件的维修活动能在充分的保障下及时开展的同时,还能将全周期的总维修成本控制在较低水平,提高航空公司的经济效益,所以相较于不考虑部件综合风险影响度的维修决策,部件的总维护成本会较低。

1.1 综合风险影响度因素分析

1.1.1 部件重要度

本文研究中的部件重要度代表部件在民机系统中正常运行时所处地位的重要程度,部件重要度越高,其产生的故障导致整个系统无法正常运行时长越长、导致的停机损失越高等,对民机系统正常工作产生的影响越严重。

通过分析不同部件在系统中的功能与地位,基于民机系统正常工作和专家经验,本文考虑影响部件重要度的影响因素为如下。

(1)部件造价。部件造价是从经济的层面对民机系统部件对其重要度进行评价考量的一种指标,部件的制造工艺和复杂度会直接影响其造价,部件造价分级如表1所示。一些民机系统部件因为其特殊性能、专利技术使其难以替代性越高,所以价格相对较高,而部件制造越精密,那么其在民机系统中地位也越高,即在系统中越重要。同时的价格直接影响维修和替换的成本,对于高造价的系统部件,维修可能需要更多的资源和资金,而替换可能会带来更高的成本。

表1 部件造价分级

Table 1 Component cost classification

指标名称	分级	评定等级描述	等级分值
部件造价/万元	1 000 及以上	很重要	9
	500 ~ 1 000	重要	7
	100 ~ 500	一般	5
	10 ~ 100	轻微	3
	10 及以下	影响极小	1

(2)部件故障可监测性。部件故障可监测性能保证在重要部件故障时快速通知相关人员做出反应,从而避免严重影响的发生,部件故障可监测性分级如表2所示。民机系统部件故障可监测性的影响因素主要考虑对部件监测技术水平要求的高低和监测所需费用,对部件的监测费用的评级和打分基于对部件的检测技术水平要求的高低而产生。部件监测费用包含监测部件的成本及其相关硬件和软件设备的成本,例如为了实时监控某部件所构建的在线监测系统,产生的费用涵盖了数据采集、传输和终端监控设备所产生的费用。部件故障可监测性可以反映部件故障的影响大小,部件所需检测技术水平和监测所需费用越高可以表明此部件的重要度越高。

表2 部件故障可监测性分级

Table 2 Classification of component fault detectability

检测技术要求	评分	
	监测费用低	监测费用高
低	1	4
中等	4	6
高	7 ~ 8	9
非常高	8 ~ 9	10

(3)相关联部件规模。考虑民机系统部件相关联部件的规模大小是为了评估其对整个系统运行的影响和重要性。民机系统通常由多个部件和设备组成,彼此之间存在功能相关性,某些设备的功能可能直接依赖于其他设备的正常运行。部件产生故障可能导致其他相关联的部件同时失效或故障,使得维修成本上升或停机时间增加,本文研究通过受影响部件的数量来描述故障部件产生影响的严重程度。

1.1.2 部件潜在隐患

部件的潜在隐患导致其发生预警提醒、故障或者运行出现非正常情况,会使得民机系统部件正常工作受到影响,提高产生风险的可能,增加系统部件的潜在失效概率。基于民机运行和专家经验,本文考虑的部件潜在隐患影响成分有三项。

(1)预警严重度。预警严重度是指对部件预警级别的加权后累加,根据预警的急迫程度和重要性,能够将预警划分等级,以此来描述部件预警可能导致的后果的严重程度,表达式为

$$AR = \sum_{i=1}^k a_i X_i \quad (1)$$

式(1)中:AR为部件预警严重程度; a_i 为预警类别匹配的数值级别; X_i 为该种预警发生的频率; k 为预警类别的个数。

根据式(1)中的 AR 可以将部件的严重度量化成数值,数值的大小代表部件预警的严重程度,预警严重度分级如表 3 所示。

(2)故障影响度。故障影响度是指对部件产生故障导致的部件事件严重级别的数值加权后累加,能够将部件产生故障的后果进行量化。此评价指标同时考虑了两个因素,部件产生故障带来的后果的严峻级别和部件产生故障的频率,表达式为

$$FR = \sum_{i=1}^k f_i N_i \tag{2}$$

式(2)中:FR 为部件故障影响度; f_i 为部件产生故障带来的后果的严峻级别,其数值大小代表部件故障对系统造成的影响程度; N_i 为部件产生故障的频率; k 为部件故障种类个数。

根据式(2)中的 FR 可以将故障影响度量化成数值,数值的数额代表故障产生的影响的严重程度的大小,故障影响度分级如表 4 所示。

(3)维修频次。部件检修频次是指在固定的时间内对部件的检修次数,包括预期检修和非预期检修次数,其中预期检修次数是故障产生前对部件预计的检修次数,而非预期检修次数是指对于突发故障进行检修的次数。检修频次能够表征在一段时间内部件隐患的程度,检修频次越大,那么此部件的隐患也越大。

表 3 预警严重度分级

Table 3 Warning severity classification

序号	告警分类	严重程度	评定等级描述	等级分值
1	故障	紧急	很严重	9
2	异常	重要	严重	7
3	一般损伤	次要	一般	5
4	轻微损伤	一般	轻微	3
5	告知	轻微	影响极小	1

表 4 故障影响度分级

Table 4 Classification of fault impact degree

故障类型	较大故障	一级故障	二级故障	三级故障	其他
评定等级描述	很严重	严重	一般	轻微	影响极小
等级分值	9	7	5	3	1

1.2 部件综合风险影响因子的确定

本文研究中考虑的部件综合风险影响因素为部件重要度和部件潜在隐患,根据部件综合风险影响度计算模型^[21],确定部件综合风险影响因子,其表达式为

$$\varphi_s = DI_s DH_s, \quad s = 1, 2, \dots, N \tag{3}$$

式(3)中: φ_s 为部件 s 的综合风险影响度因子; DI_s

为部件 s 重要度; DH_s 为部件 s 的潜在隐患。

部件重要度影响因素集 $K = \{I_n\}$,其中 $n = 1, 2, \dots, N_1$, 本文中 N_1 为影响因素个数 3,其中, I_1 为部件造价, I_2 为部件故障可监测性, I_3 为相关联部件规模。定义部件集 $D = \{d_i\}$,其中 $i = 1, 2, \dots, N$, 本文中 N 为部件个数 4。

为了克服传统设备重要度评价指标的主观性过大的弊端,本文研究把描述对象的不同方面的多个指标信息进行综合,由此对部件风险进行整体上的评价。据此构造数据等级值序列 $x_i(I_n)$,表示部件在影响因素 I_n 下的数据等级值,通过设备重要度指标数据等级值序列,得到部件的综合相对重要度判断矩阵为

$$A^{I_n} = \begin{matrix} & d_1 & d_2 & \dots & d_N \\ \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11}^{I_n} & a_{12}^{I_n} & \dots & a_{1N}^{I_n} \\ a_{21}^{I_n} & a_{22}^{I_n} & \dots & a_{2N}^{I_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1}^{I_n} & a_{N2}^{I_n} & \dots & a_{NN}^{I_n} \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{4}$$

式(4)中: $a_{ij}^{I_n}$ 为部件 d_i 在因素 I_n 下对 d_j 的重要程度;其中 $a_{ii}^{I_n}$ 不具有实际意义,令 $a_{ii}^{I_n} = 0$;当 $i \neq j$ 时,0 代表不重要,2 代表重要,1 代表同等重要。

$$a_{ij}^{I_n} = \begin{cases} 2, & x_i(I_n) > x_j(I_n) \\ 1, & x_i(I_n) = x_j(I_n) \\ 0, & x_i(I_n) < x_j(I_n) \end{cases} \tag{5}$$

在相同指标 I_n 下,部件重要度判断矩阵的行向量元素之和,就是因素 I_n 下的部件 d_i 的相对重要度。

$$a_i^{I_n} = \sum_{j=1}^N a_{ij}^{I_n} \tag{6}$$

为了合理地计算部件重要度在不同影响因素之间的相互影响,本文研究使用层次分析法对不同的因素间进行权重分析。

先构造部件重要度指标的判断矩阵,计算出最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量。利用式(7)确定各部件重要度影响因素的合理权重值。

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{N_1} w_i} \tag{7}$$

$W' = [w'_1, w'_2, \dots, w'_{N_1}]$ 为部件重要度指标在进行归一化后得出的相对权重,然后根据表 5 对矩阵进行一致性检验。

表 5 平均随机一致性指标 RI 值

Table 5 Average random consistency index RI value

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

注: n 为综合相对重要度判断矩阵阶数。

并将其代入式(8), 计算出部件的综合相对重要度。

$$a_i^{\text{sum}} = \sum_{n=1}^{N_1} w'_n a_i^{l_n} \quad (8)$$

为了避免量纲与数量级的影响, 使用归一化方法对数据进行处理, 表达式为

$$f(z) = \frac{Bz}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(i)} \quad (9)$$

式(9)中: z 为归一化前的变量; B 为调节因子。

$$B = \frac{1}{\max z} \quad (10)$$

结合式(9), 得到归一化后的部件重要度, 即

$$DI_s = f(a_i^{\text{sum}}) \quad (11)$$

计算部件潜在隐患的过程与以上过程相同, 由以上方法从而可以得到部件潜在隐患。再将所得部件重要度与部件潜在隐患代入式(3)可得到设备 s 的综合风险影响因子。

2 考虑风险影响的机会维修决策模型

建立费用率模型假设如下。

(1) 系统的部件之间的故障分布都服从威布尔分布。

(2) 系统运行过程中如若出现非预期故障, 则对部件进行最小维修, 维修时不忽略停机时间。

(3) 维修中所需人力资源和专用设备充足。

(4) 进行预防性维修是不完美维修, 即“修旧如旧”。

(5) 预防性更换使系统恢复全新状态, 然后系统开始一个新的工作周期。

(6) 系统中部件从全新状态开始运行, 部件可靠度从 1 开始逐渐下降。

(7) 系统中任意部件进行维修时, 整个系统处于停机状态。

2.1 考虑风险影响的部件费用率函数

以可靠度为预防性维修的限制条件, 当部件的可靠度降低至预定的最低可靠度阈值 R_{\min} 时, 则触发对该部件的预防性维修行为。

部件 s 在第 i 个预防性维修周期中的故障率模型表达式为

$$\lambda_{is}(t) = \begin{cases} \lambda_{is}(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, & i = 1 \\ \lambda_{is}(t) = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta} \prod_{c=1}^{i-1} b_{cs}\right) \left(t + \sum_{c=1}^{i-1} a_{cs} T_{cs}\right)^{\beta-1}, & 2 \leq i \leq N_s + 1 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: β 为部件的形状参数; η 为部件的长度参数; a_{cs} 和 b_{cs} 为部件的役龄回退因子和故障率递增因子; T_{cs} 为预防性维修间隔时间。

由可靠性理论, 能够建立系统部件 s 在第 i 个预防性维修周期内的可靠度函数 $R(t)$ 与失效率 $\lambda(t)$ 函数之间的联系。

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (13)$$

$$\int_0^{T_{1s}} \lambda_{1s}(t) dt = \int_0^{T_{2s}} \lambda_{2s}(t) dt = \dots = \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt = -\ln R_{\min} \quad (14)$$

由式(14)能计算得系统部件 s 在第 i 个预防性维修周期内的遇到非预期故障的次数是 $-\ln R_{\min}$, 即一个预防性维修周期内的最小维修次数为 $-\ln R_{\min}$ 。

联立式(12) ~ 式(14)能够算得各部件的不同预防性维修间隔时间, 即

$$T_{is} = \begin{cases} T_{1s} = \eta (-\ln R_{\min})^{\frac{1}{\beta}}, & i = 1 \\ T_{is} = \left[\frac{\eta^\beta (-\ln R_{\min})}{\prod_{c=1}^{i-1} b_{cs}} + \left(\sum_{c=1}^{i-1} a_{cs} T_{cs} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} - \sum_{c=1}^{i-1} a_{cs} T_{cs}, & 2 \leq i \leq N_s + 1 \end{cases} \quad (15)$$

对民机系统部件的突发风险影响损失进行定量分析, 引入风险影响损失成本的概念, 假设单次突发风险影响损失成本为 c_{risk} , 那么整个维护周期风险影响损失成本为

$$C_{\text{risk}} = \varphi_s c_{\text{risk}} \sum_{i=1}^{N_s+1} \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt \quad (16)$$

可得部件 s 的一次预防性更换周期的费用率函数为

$$C_h = \frac{(N_s + 1)C_{fs}(-\ln R_{\min}) + C_{ps}N_s + C_{gs} + C_{\text{risk}}}{\sum_{i=1}^{N_s+1} [T_{is} + t_{fs}(-\ln R_{\min})] + N_s t_{ps} + t_{gs}} \quad (17)$$

式(17)中: i 为部件 s 在预防性维修周期中的维修次数; C_{fs} 为最小维修费用; C_{ps} 为预防性维修费用; C_{gs} 为预防性更换费用; 部件 s 的整个维修周期的总时间包括系统正常工作时间 $\sum_{i=1}^{N_s+1} T_{is}$ 、每次最小维修时间 t_{fs} 、预防性维修时间 t_{ps} 和预防性更换时间 t_{gs} 。

计算求得目标函数 C_h 的最小值, 当 C_h 取最小值时部件 s 所对应的预防性维修次数为该部件的最优预防性维修次数 N_s 。

2.2 考虑风险影响的机会维修策略

民机系统部件是经典的多部件系统,当系统运行时,有部件达到预防性维修或更换指标时,系统中的其他部件由于系统维修停机而获得一次提前维修的机会^[17]。本文研究根据系统的可靠度来判断其他部件需要一同进行机会维修,即当系统中某部件维修或更换时,如系统中有其他部件的可靠度 $R_s(t)$ 满足机会维修阈值范围,则对相应部件采取机会维修。

本文构建的民机系统部件机会维修成本模型中的 $C_{\min}(\Delta R_1, \dots, \Delta R_s, \dots, \Delta R_k)$ 能够由系统中不同部件的机会维修阈值得到,提供一组符合要求的决策变量时,再由公式能够计算得最优的维修成本,如图2所示。

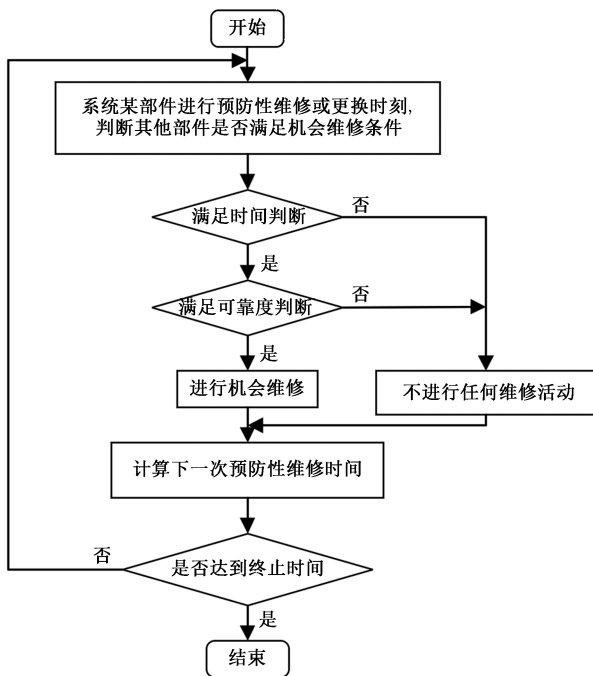


图2 机会维修思想的选择和判断过程

Fig. 2 The selection and judgment process of opportunity maintenance concept

设定系统部件的机会维修阈值 ΔR_s , 如图3所示,当 $R_s(t) - R_{\min} > \Delta R_s$, 在时刻 t_n 对部件 s 不进行任何维修活动;当 $0 < R_s(t) - R_{\min} \leq \Delta R_s$, 在时刻 t_n 对部件 s 开展机会维修,同时对部件 s 的预防性维修次数 $n + 1$; 当 $0 < R_s(t) - R_{\min} \leq \Delta R_s$ 且 $n = N_s + 1$ 时,则对部件 s 预防性更换,同时 n 更新为0。

2.3 考虑风险影响的机会维修模型

民机系统在运行周期中运行产生的总成本主要分为三个部分,分别是直接维修成本、停机损失、风险影响损失成本,如果没考虑风险影响损失,则加入惩罚成本部分。

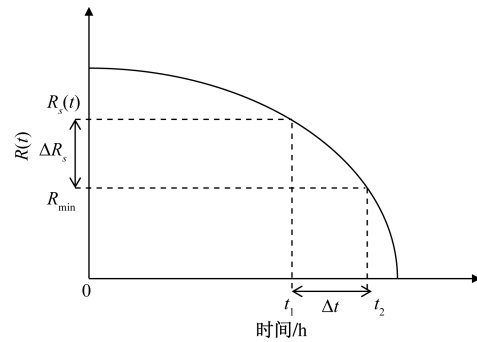


图3 机会维修原理图

Fig. 3 Opportunity maintenance schematic

2.3.1 直接维修成本

民机系统直接维修成本包括预防性维修成本 C_{ps} 、预防性更换成本 C_{gs} 和对非预期故障的最小维修费用 C_{fs} 。

C_s 代表在 $[0, T]$ 期间对部件 s 进行维修所需要的费用。其中,部件 s 在第 t_{n-1} 次到第 t_n 次预防性维修期间的直接维修成本 C_{psn} 为

$$C_{psn} = \begin{cases} 0, & G(s, t_n) = 0 \\ C_{ps} + C_{fs} \int_0^{T_{ns}} \lambda_{ns}(t) dt, & G(s, t_n) = 1 \\ C_{gs} + C_{fs} \int_0^{T_{ns}} \lambda_{ns}(t) dt, & G(s, t_n) = 2 \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $\lambda_{ns}(t)$ 为部件 s 在间隔 T_{ns} 内的故障率函数表达式,部件 s 在每个预防性维修周期内的运行时间为 $T_{ns} (n = 1, 2, \dots, m_s)$; $G(s, t_n) = 0$ 为不对部件 s 进行任何维修活动; $G(s, t_n) = 1$ 为对部件 s 进行预防性维修; $G(s, t_n) = 2$ 为对部件 s 进行预防性更换。

因此部件 s 在系统运行周期 $[0, T]$ 内的直接维修成本为

$$C_s = \sum_{n=1}^N C_{psn} \quad (19)$$

民机系统中的 k 个部件在固定时间 $[0, T]$ 内的直接维修总成本为

$$C_k = \sum_{s=1}^k C_s = \sum_{s=1}^k \sum_{n=1}^N C_{psn} \quad (20)$$

2.3.2 停机损失

民机系统的停机损失包含两个部分:对系统部件进行预防性维修时导致的停机损失和发生非预期故障引起的停机损失。

(1) 预防性维修停机损失。系统的停机损失通常与系统的停机时间呈正相关,在实施第 n 次预防性维修活动时,系统的停机时间为

$$T_{pdn} = \max(t_{psn}, t_{gsn}), \quad 1 \leq s \leq k \quad (21)$$

式(21)中: t_{ps} 为一次预防性维修所需时间; t_{gs} 为一次预防性更换所需时间。

民机系统单位时间的停机损失是 C_d , 因此可以得到系统在固定时间 $[0, T]$ 内产生的停机损失为

$$C_{pd} = C_d T_{pd} = C_d \sum_{n=1}^N T_{pd,n} \quad (22)$$

式(22)中: T_{pd} 为运行时间范围 $[0, T]$ 内民机系统预防性维修总停机时间。

(2)故障维修停机损失。在部件 s 在运行周期 $[0, T]$ 内,执行的预防性维修次数为 m_s , 其中

$$m_s = pN_s + q, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (23)$$

式(23)中: p 为部件 s 在运行的周期 $[0, T]$ 中的预防性更换次数; q 为在运行的时间范围中对部件 s 进行的最末一次预防性更换之后,又对部件 s 持续执行的预防性维修活动次数。

部件 s 在固定运行时间 $[0, T]$ 中系统最小维修停机时间为

$$T_{fds} = t_{fs} \left[p \sum_{i=1}^{N_s+1} \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt + \sum_{i=1}^q \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt \right] \quad (24)$$

式(24)中: t_{fs} 为部件 s 进行一次最小维修需要的时间; T_{fds} 为部件 s 在固定运行时间 $[0, T]$ 内遇到非预期故障导致的系统停机时间,即对部件 s 进行最小维修的时间; T_{is} 为部件 s 在第 i 个预防性维修周期内的工作持续时间。

那么系统在固定运行时间 $[0, T]$ 内由于非预期故障导致的停机损失为

$$C_{fd} = C_d T_{fd} = C_d \sum_{s=1}^k T_{fds} = C_d \sum_{s=1}^k t_{fs} \left[p \sum_{i=1}^{N_s+1} \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt + \sum_{i=1}^q \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt \right] \quad (25)$$

2.3.3 风险影响损失成本

民机系统在运行时间周期内运行遇见非预期故障时,仅由故障停机成本描述故障的风险并不准确,因此考虑构建风险评估模型^[20,23],定量地衡量民机系统运行期间的风险影响损失,因此可以确定民机系统所有部件在固定时间内总风险影响损失成本 C_{ar} 为

$$C_{ar} = \sum_{s=1}^k c_{risk} \varphi_s \left[p \sum_{i=1}^{N_s+1} \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt + \sum_{i=1}^q \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt \right] \quad (26)$$

2.3.4 惩罚成本

不考虑部件风险影响损失的维修决策,由于在民机系统在全周期的运行和维护方面对部件在备件采购和储备时,没有将部件的风险影响损失影响量化并评估分级并有针对性地进行合理备件管理,对系统部件风险影响分析不够深入、分类管理不细,忽略了其可能带来突发故障的影响,需要更多的后期采购成本和库存成本^[24],因此在计算不考虑部件综合影响风险与维修决策的总维修成本时需要纳入惩罚成本 C_o 。

根据民机系统部件在运行周期中运行产生的各项成本,可以计算得到系统在时间周期 $[0, T]$ 中考虑部件综合影响风险与维修成本为

$$C = C_k + C_{pd} + C_{fd} + C_{ar} \quad (27)$$

综上所述,民机系统部件在运行周期 $[0, T]$ 中,基于可靠度的、以最小成本为目标的预防性机会维修优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min C(\Delta R) = C_k + C_{pd} + C_{fd} + C_{ar} \\ -\ln(R_{\min} + \Delta R_s) \leq \int_0^{T_{is}} \lambda_{is}(t) dt \leq -\ln R_{\min} \\ 0 \leq \Delta R_s \leq \min_{1 \leq s \leq k} (1 - R_{\min}) \end{cases} \quad (28)$$

3 算例分析

3.1 参数设定

为了验证上文构建的民机系统部件机会维修成本函数模型的合理性,采用航空公司的某系统部件的已知参数和仿真数据对其展开验证。系统中所有部件寿命分布服从两参数 Weibull 分布,同时由于部件之间具备结构或时间上的相关性,因此在进行维修任务时一般会考虑将其同时维修。设定系统运行时设定系统运行时间为 600 d,系统的停机损失是 $C_d = 500$ 元/d,系统中各部件寿命分布服从独立同分布,役龄回退因子 a_{is} 和故障率递增因子 b_{is} 取值为 $a_{is} = \frac{i}{5i+9}, b_{is} = \frac{13i+1}{12i+1}$;民机系统部件的其他参数均参考常用指标,如表 6 所示。

3.2 计算过程

基于层次分析法构建的风险判断矩阵,由式(7)

表 6 部件参数

Table 6 Component parameters

部件	β	η	C_{fs}	C_{ps}	C_{gs}	c_{risk}	t_{fs}	t_{ps}	t_{gs}	R_{\min}
1	1.4	143	960	1 950	7 950	500	0.9	0.4	0.2	0.75
2	0.8	55	480	1 000	1 600	500	0.8	0.3	0.1	0.80
3	2.5	93	400	1 080	7 250	500	1.0	0.6	0.4	0.86
4	2.1	73	600	1 780	5 100	500	0.9	0.4	0.3	0.85

可计算出矩阵的最大特征值,将最大特征根 ξ_{\max} 对应的特征向量进行归一化,得到权重向量 W' 。将式(4)、式(5)、式(8)联立后将评分数值代入,能够算得部件的综合相对重要度矩阵 A ,将 A 中的各个 a_i^{sum} 代入式(9)可计算出归一化后的部件重要度值。基于如上方法,也可以得到部件的潜在隐患,最后由式(3)可以计算出部件综合风险影响度,如表 7 所示,并得到图 4。

由表 7 所得结果可知,部件 3 的综合风险影响度最高,因此部件 3 产生故障对系统风险的影响最大,带来的损失最高,因此在风险管控时应该对其进行重点关注。

将式(15)~式(17)联立后,把表 6 中的不同部件参数代入可得出各个部件在系统的运行时间周期 $[0, T]$ 内的最优预防性维修间隔时间 T_i ,如表 8 所示。

表 7 各部件综合风险影响度计算结果
Table 7 Calculation results of comprehensive risk impact of each component

部件代号	部件重要度值	部件潜在隐患值	部件综合风险影响度值
1	0.558 4	0.364 4	0.203 5
2	0.421 2	0.465 3	0.196 0
3	0.924 3	0.531 7	0.491 5
4	0.722 4	0.365 8	0.264 3

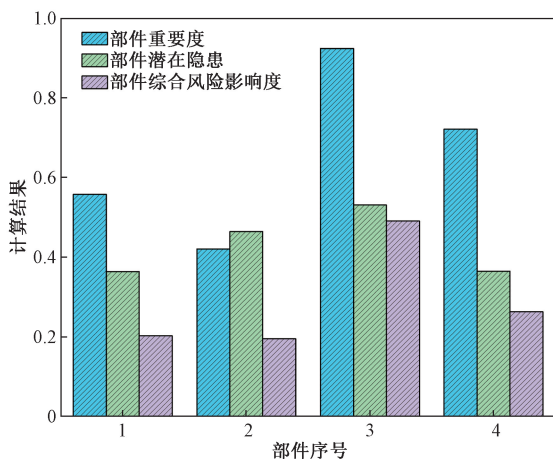


图 4 部件综合风险影响度计算结果柱状图
Fig. 4 Bar chart of the calculated comprehensive risk impact of components

表 8 预防性维修时间间隔
Table 8 Preventive maintenance interval

部件	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
1	58.73	52.57	46.48	41.11	36.49
2	8.44	8.36	8.11	7.80	7.44
3	43.64	39.27	34.04	29.02	24.61
4	30.73	27.53	23.87	20.46	17.52

计算得出的各部件最优预防性维修间隔时间,再将其代入式(17)可得到各部件在运行周期内不同维修次数对应的不同预防性维修费用率,如表 9 所示。

表 9 不同预防性维修的费用率
Table 9 Cost rates for different preventive maintenance

部件	1	2	3	4
1	97.75	89.18	88.66	91.53
2	152.68	145.30	144.53	146.85
3	104.54	90.90	88.98	92.13
4	123.67	119.60	125.58	136.31

各部件费用率最低的次数即为各部件在一次预防性更换周期内的最优维修次数 N_i ,由表 9 可得,系统中部件的最优预防性维修次数为 3、3、3 和 2 次。

3.3 计算结果分析

经过运算可得三种不同维修策略的运行结果,如表 10 所示。由表 10 可得,将民机系统中各部件的预防性维修与更换独立进行,不考虑综合风险影响损失的预防性维修决策,在运行时间周期 $[0, 600 \text{ d}]$ 内系统维护总成本为 319 306.19 元,预防性维修次数为 114 次,停机时间为 45.4 d,停机损失为 22 700 元。而考虑综合风险影响损失的预防性维修决策在运行时间周期内系统维护总成本为 293 294.60 元,相较于不考虑综合风险影响损失的预防性维修决策总成本降低了 8.15%,预防性维修与更换次数为 103 次,下降了约 9.65%,停机时间为 41.7 d,停机损失为 20 850 元。

运用 MATLAB 对构建的民机系统部件机会维修成本模型进行仿真求解,仿真结果如图 5 所示。由图 5 运行结果可得,经过 100 次迭代后,以总成本最低为目标的考虑风险影响损失的系统机会维修策略在运行时间周期 $[0, 600 \text{ d}]$ 内系统维护总成本为 254 799.59 元,与之对应的机会维修阈值为 $\Delta R = (0.001 8, 0.059 5, 0.005 2, 0.023 2)$ 。相较于考虑风险影响损失的预防性维修策略总成本降低

表 10 不同维修策略下的结果对比
Table 10 Comparison of results under different maintenance strategies

参数	不考虑综合	考虑综合	考虑综合
	风险影响	风险影响	风险影响
	损失的预	损失的预	损失的机
	防性维修	防性维修	会维修
总维修费用/元	319 306.19	293 294.60	254 799.59
预防性维修与更换次数	114	103	67
预防性维修停机时间/d	45.4	41.7	23.9
预防性维修停机损失/元	22 700	20 850	11 950

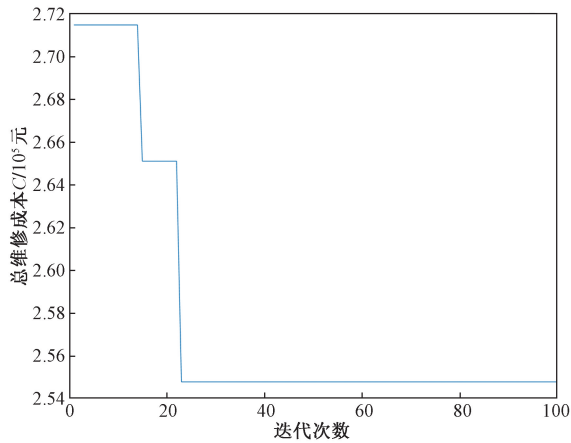


图5 机会维修成本

Fig. 5 Opportunity maintenance cost

38 495.01 元,总费用降低了 13.13%,而预防性维修与更换次数也从 103 次下降为 67 次,减少了 34.95%,停机时间从 41.7 d 减少至 23.9 d,停机损失减少 8 900 元,减少停机损失是民机系统维修策略成本降低的重要因素。相较于不考虑综合风险影响损失的预防性维修决策,民机系统的总维护成本降低约 20.20%,预防性维修与更换次数减少率约 41.23%,预防性维修停机时间减少率达 47.36%。

4 结论

针对民机系统预防性维修决策,本文模型规避了现有模型对民机系统综合风险影响度认识不足的问题,并得到以下结论。

(1)建立的民机系统考虑多因素综合风险影响预防性机会维修优化决策中,计算风险影响损失的影响度因子运用的评级指标模型全面考虑了民机系统部件多层次、隐性的风险因素,得到更加合理全面的部件风险影响损失的结果,给予民机系统可靠的数据支持,为民机系统预防性维修提供更加合理的维修决策,本文模型可以有效地降低工作周期中民机系统维修总成本,克服了以往预防性机会维修决策中没有考虑部件的风险影响而进行区别备件,而导致备件成本过高的不足,更符合民机系统维修的实际情况。

(2)研究结果可以进一步丰富,由于本文建立的民机系统部件机会维修优化模型仅针对成本这一单一目标,没有考虑民机系统部件可用度,后续将结合维修成本和可用度建立多目标预防性维修优化模型。

参 考 文 献

[1] Gan S, Song Z, Zhang L. A maintenance strategy based on system

reliability considering imperfect corrective maintenance and shocks [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 164. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107886.

- [2] Syamsundar A, Naikan V N A, Wu S. Estimating maintenance effectiveness of a repairable system under time-based preventive maintenance [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107278.
- [3] Broek U H M, Teunter R H, De Jonge B, et al. Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 214. DOI: 10.1016/j.res.2021.107743.
- [4] Dong W, Liu S, Du Y. Optimal periodic maintenance policies for a parallel redundant system with component dependencies [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 138. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106133.
- [5] Dao C D, Zuo M J. Selective maintenance of multi-state systems with structural dependence [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 159: 184-195.
- [6] Zheng R, Qian X, Gu L. Group maintenance for numerical control machine tools: a case study [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2023, 72(4): 1407-1419.
- [7] Li X, Ran Y, Wan F, et al. Condition-based maintenance strategy optimization of meta-action unit considering imperfect preventive maintenance based on wiener process [J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2022. DOI:10.1007/s10696-021-09407-w.
- [8] 王海龙, 张营, 左付山. 基于比例故障率模型的柴油发动机视情维修决策 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(31): 13299-13306.
Wang Hailong, Zhang Ying, Zuo Fushan. Condition-based maintenance decision of diesel engine based on proportional failure rate model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(31): 13299-13306.
- [9] 葛伟凤, 孟庭宇, 罗衡, 等. 水下生产系统关键设备维修策略优化方法 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(4): 1400-1408.
Ge Weifeng, Meng Tingyu, Luo Heng, et al. Optimization method of key equipment maintenance strategy for subsea production system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(4): 1400-1408.
- [10] Wu Y, Yang Z, Wang J, et al. Optimizing opportunistic preventive maintenance strategy for multi-unit system of CNC lathe [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(1): 145-155.
- [11] Vu H C, Do P, Fouladirad M, et al. Dynamic opportunistic maintenance planning for multi-component redundant systems with various types of opportunities [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 198: 106854.
- [12] Holguin L. Conditioned based maintenance (CBM) [C]//IEEE Autotestcon. New York: IEEE, 2005: 188-193.
- [13] Zhang X, Zeng J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunitsystems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(2): 479-498.
- [14] Ba H T, Cholette M E, Borghesani P, et al. Opportunistic maintenance considering non-homogenous opportunity arrivals and stochastic opportunity durations [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 160: 151-161.

- [15] 薛朝改, 禹鹤, 李淑敏. 考虑人力资源约束的串联系统机会维修策略优化[J]. 机床与液压, 2023, 51(9): 207-214.
Xue Zhaogai, Yu He, Li Shumin. Optimization of opportunistic maintenance strategy for series systems considering human resource constraints[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(9): 207-214.
- [16] 刘晓祖, 王红, 何勇, 等. 考虑人力资源动态配置的动车组系统机会维修模型[J]. 机械科学与技术, 2024. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20230137.
Liu Xiaozu, Wang Hong, He Yong, et al. Opportunistic maintenance model of electric multiple unit system considering dynamic allocation of human resources[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20230137.
- [17] Zhang C, Gao W, Guo S, et al. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 606-612.
- [18] 张友鹏, 杨凯雄, 石磊. 可靠度约束下不完全预防性维护经济优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(12): 3019-3026.
Zhang Youpeng, Yang Kaixiong, Shi Lei. Economic optimization model for imperfect preventive maintenance under reliability constraints[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(12): 3019-3026.
- [19] 鲍晗, 左洪福, 蔡景, 等. 基于概率风险分析的航空发动机控制系统故障风险评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(10): 38-43.
Bao Han, Zuo Hongfu, Cai Jing, et al. Risk assessment of aero-engine control system based on probability risk analysis[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(10): 38-43.
- [20] 王红, 熊律, 杜维鑫, 等. 考虑故障风险的动车组部件预防性维护优化建模[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 123-129.
Wang Hong, Xiong Lü, Du Weixin, et al. Optimization of preventive maintenance for component of electric multiple unit with consideration of failure risk[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 123-129.
- [21] 吴润泽, 陈文伟, 邹英杰, 等. 基于多因素融合的电网高风险设备评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 1-7.
Wu Runze, Chen Wenwei, Zou Yingjie. Evaluation method of high risk equipment in power grid based on multiple factor fusion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 1-7.
- [22] 李耀华, 魏启东, 孙世磊. 机会维修策略下的民机系统维修决策优化模型[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 808-815.
Li Yaohua, Wei Qidong, Sun Shilei. Maintenance decision optimization model of civil aircraft system under opportunistic maintenance[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(5): 808-815.
- [23] Novikova O, Shamileva L, Vicen V, et al. The modernization of current methods and technologies for risk assessment, modeling and forecasting[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1804(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1804/1/012057.
- [24] Şahin M, Eldemir F, Turkyilmaz A. Inventory cost minimization of spare parts in aviation industry[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 59: 29-37.