

文章编号: 1674-8190(2022)05-141-07

航空发动机多状态寿命控制策略及仿真研究

崔利杰¹, 李皓祥², 李薛¹, 童奇¹

(1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051)

(2. 中国人民解放军 93671 部队, 南阳 474300)

摘要: 航空发动机寿命控制是航空装备维修保障工作的重要内容, 针对当前航空发动机状态寿命多、使用控制策略单一、状态寿命消耗浪费严重等问题, 利用多目标决策模型, 分别考虑多种状态寿命消耗约束, 提出基于航空发动机多状态寿命的控制策略; 在利用 Simio 3D 构建发动机使用流程仿真模型的基础上, 将所提寿命控制策略进行注入, 验证所提策略的合理性和可行性。研究结果能够为航空装备使用单位和维修人员制定发动机寿命控制策略提供技术支持和方法参考。

关键词: 航空发动机; 状态寿命; 控制策略; 仿真验证

中图分类号: V263.6

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.15

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Multi-state Life Control Strategy and Simulation for Aero-engine

CUI Lijie¹, LI Haoxiang², LI Xue¹, TONG Qi¹

(1. College of Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. 93671 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Nanyang 474300, China)

Abstract: Life control of aero-engine is an important part of aviation equipment maintenance support. To solve problems, such as existing multiple state life, single using strategy and serious state life consumption, a multi-state life control model of aero-engine is developed by using multi-objective decision-making model and considering various state life consumption constraints respectively. Combined with the proposed life control strategy injection method based on engine service process simulation, the rationality and feasibility of the proposed strategies are verified. The research results can provide technical support and method reference for the development of engine life control strategy for aviation equipment users and maintenance staff.

Key words: aero-engine; state life; control strategy; simulation verification

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2022-02-08

基金项目: 装发预研基金(41402030401)

通信作者: 崔利杰, 13488192369@139.com

引用格式: 崔利杰, 李皓祥, 李薛, 等. 航空发动机多状态寿命控制策略及仿真研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 141-147.

CUI Lijie, LI Haoxiang, LI Xue, et al. Research on multi-state life control strategy and simulation for aero-engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 141-147. (in Chinese)

0 引言

寿命消耗情况是衡量发动机状态的重要因素,对发动机寿命的控制是航空装备维修质量控制工作的重要内容之一^[1]。由于飞机使用要求不同,航空发动机寿命消耗不限于常规寿命,更多地需要将常规寿命与状态寿命协调、匹配使用。但当前由于各种原因,航空发动机寿命控制工作表现为:重视飞机寿命梯次控制,轻视发动机寿命梯次控制;重视发动机常规寿命,轻视发动机典型状态寿命;重视发动机使用需求匹配,轻视发动机的寿命参数匹配;重视定性分析,轻视量化验证^[2-3]。这样的发动机寿命控制策略很难适应新时代航空发动机的使用需要,亟需提出基于状态寿命消耗的发动机寿命控制策略。仿真方法是军事领域较为可行且有效的一种验证手段,其成本低、效率高、调整方便,能够验证发动机寿命控制策略的合理性和可行性,因此目前在装备维修管理领域,仍较多地采用仿真手段进行方法验证。

当前,国内外在经过多年探索后,提出了不同的发动机寿命控制策略。例如,曹明等^[4]基于民用航空发动机健康管理的需求及发展目标,分析民用航空发动机健康管理及寿命管理的现状及发展趋势,指出了未来需要重点关注的研发方向;陈跃良等^[5]从对军用飞机结构日历寿命相关问题的思考出发,提出了多种发动机寿命控制策略;Fu X 等^[6]研发了航空发动机维修策略优化支持系统;J. Crocker 等^[7]基于软约束和硬约束提出了一种以可靠性为中心的军用航空发动机寿命控制与维修策略优化方法;M. P. Kleeman 等^[8]考虑到航空发动机部件之间的互换策略,提出了基于多目标维修优化的航空发动机寿命模型;此外,陈少龙等^[9]、李琨等^[10]、甘晓华等^[11]也分别对航空发动机的计算管理、梯次控制等寿命控制问题进行了研究。上述研究所提策略能够在相应条件下对发动机寿命控制发挥一定作用,但仍不能解决我军发动机寿命状态多、与飞行科目数据关联少、可行性验证难等问题。

提出策略是发动机多状态寿命控制的第一步,开展可行性和合理性验证对于日常训练和作

战使用保障同样十分重要。对于航空装备的研制、使用与运维策略等管理流程性的验证,仿真技术无疑是经济有效的技术手段。在目前成熟的军事领域,仿真技术得到了广泛应用。例如,赵永等^[12]利用 ExtendSim、Netlogo、Simio 3D 等软件开展了装备管理的流程仿真;丛继平等^[13]利用 Net-Logo 软件对航空装备保障体系进行了仿真;杜茵^[14]开展了智能化生产车间建模与 Simio 仿真;吴鼎新等^[15]将 Simio 仿真系统用于集装箱运输教学中;黄庚保^[16]提出了生产系统建模与 Simio 仿真;特别是, A. Bousdekis 等^[17]总结了一系列目标导向的维修保障仿真来辅助决策的方法,为航空发动机仿真提供了重要借鉴。然而,目前的研究对于当前实战化战训任务下不同飞行科目高度并发、多种发动机状态耦合共存、单一寿命控制策略难以适应的发动机寿命控制策略的验证问题鲜有涉及,也缺少成熟有效的验证模型。

本文重点围绕飞行科目、发动机使用状态、寿命控制策略的关联关系,构建多状态控制模型,运用多目标决策方法提出发动机多状态寿命控制策略,并使用 Simio 3D 仿真软件进行策略仿真验证。

1 发动机多状态寿命特征与使用分析

1.1 多状态寿命特征及状态分析

航空发动机在实际工作中由于飞机面临的不同飞行阶段、飞行任务和飞行环境,对发动机的功率(推力)会有不同的要求,使得飞机存在多种飞行状态、发动机也存在多种工作状态,对于不同工作状态,提出了不同的发动机寿命限制要求。因此仅考虑常规寿命的消耗不能准确反映发动机寿命消耗的实质。只有结合发动机处于大负荷状态的寿命消耗——状态寿命消耗的现实情况进行具体分析,才能对现阶段发动机寿命消耗情况有一个清楚的认知。

以某型发动机^[18]为例,通过数据收集,对比分析一年内某单位该型发动机多状态寿命消耗情况,如图 1 所示,可以看出:发动机八种状态寿命的消耗量具有明显差异。为突出典型性,选择乙状

态和 Z_2 状态作为本文研究的显著状态。

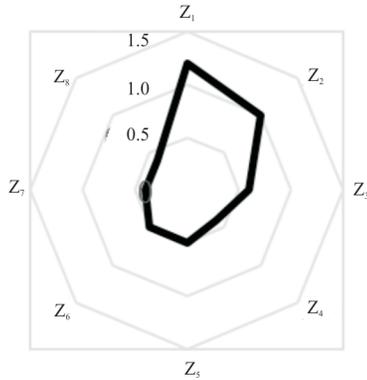


图 1 发动机多状态寿命消耗
Fig. 1 Engine multi-state life consumption

1.2 飞行科目与状态寿命关系分析

排除无法估计的飞行员根据实际情况的操作外,飞行科目是发动机状态寿命消耗的关键致因。由于在当前实战化训练背景下,发动机使用中需要频繁进入加力和最大加力状态的训练科目增多,例如大速度、大过载、突防突击、实弹打靶等科目,产生的直接影响就是发动机的状态寿命消耗呈现快、多、杂的趋势。通过分析某型发动机在一段时期内的空中使用数据,得到执行不同训练科目时发动机状态寿命(Z_1 状态和 Z_2 状态)的消耗情况如图 2 所示,横坐标轴 $K_1 \sim K_{13}$ 代表当前该单位日常进行的飞行科目(数据值为修正值)。

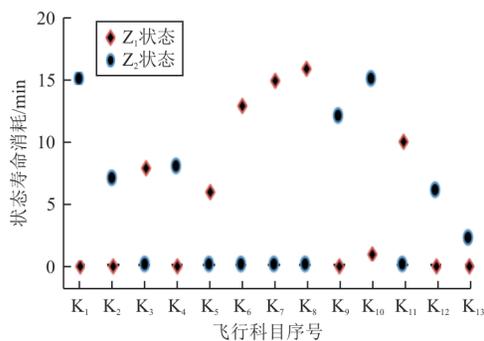


图 2 飞行科目下 Z_1 状态和 Z_2 状态寿命消耗关系
Fig. 2 Life consumption relationship between Z_1 state and Z_2 state under flight subject

从图 2 可以看出:飞机执行不同飞行科目,会对发动机状态寿命消耗造成直接影响。

对于发动机寿命而言,飞行科目中的每个元素,在发动机状态寿命指标的集合中总是存在一个唯一的元素——状态寿命指标与其对应,即在

飞行科目和发动机状态寿命指标之间存在映射关系,记作 $f: K \rightarrow Z, K = \{K_1, K_2, \dots, K_{13}\}, Z = \{Z_1, Z_2\}$ 。映射关系如图 3 所示。

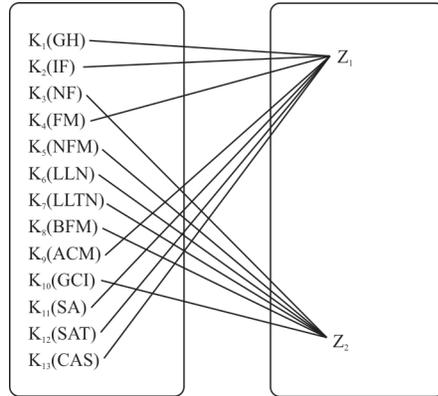


图 3 飞行科目与 Z_1 状态寿命和 Z_2 状态寿命映射
Fig. 3 Mapping of flight subject to Z_1 status life and Z_2 status life

2 发动机多状态寿命控制策略制定

2.1 变量定义

根据上述关系,提出发动机多状态寿命控制策略所需变量(各变量的单位均为小时)如下。

(1) 年常规寿命消耗量: Y_{RLC} 。

(2) 年 Z_1 状态寿命消耗量: $Y_{CLC} = \sum_{i=1}^{13} [(C_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}]$ (C_{LC} 为 Z_1 状态寿命消耗量; S_{TF} 为单位架次飞行时间; T_A 为飞行任务占比)。

(3) 年 Z_2 状态寿命消耗量: $Y_{TLC} = \sum_{i=1}^{13} [(T_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}]$ (T_{LC} 为 Z_2 状态寿命消耗量)。

(4) 常规总寿命: $R_L = Z_{L3} \times P_N$ (Z_{L3} 为单机常规寿命; P_N 为飞机数目)。

(5) Z_1 状态总寿命: $C_L = Z_{L1} \times P_N$ (Z_{L1} 为单机 Z_1 状态寿命; P_N 为飞机数目)。

(6) Z_2 状态总寿命: $T_L = Z_{L2} \times P_N$ (Z_{L2} 为单机 Z_2 状态寿命; P_N 为飞机数目)。

(7) 常规寿命消耗占比: $R_{LCP} = Y_{RLC} \div R_L = Y_{RLC} \div Z_{L3} \times P_N$ (Y_{PLC} 为年常规寿命消耗量; R_L 为常规总寿命)。

(8) Z_1 状态寿命消耗占比: $C_{LCP} = Y_{CLC} \div C_L =$

$$Y_{CLC} = \sum_{i=1}^{13} [(C_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}] \div (Z_{L1} \times P_N)$$

(9) Z_2 状态寿命消耗占比: $T_{LCP} = Y_{TLC} \div T_L =$

$$\sum_{i=1}^{13} [(C_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}] \div (Z_{L2} \times P_N)$$

以某具体单位为例,假定其在位飞机数为 30 架(飞机均为新机),每架飞机发动机常规寿命为 800 h, Z_1 状态寿命为 40 h, Z_2 状态寿命为 100 h。该部队年飞行小时数为 5 000 h。单位飞行任务时间与状态寿命消耗量如表 1 所示。

表 1 飞行任务寿命消耗和任务占比

Table 1 Mission life consumption and mission proportion

飞行科目	S_{FT}/min	C_{LC}/min	T_{LC}/min	$T_A/\%$
K ₁	45	15	0	3.2
K ₂	60	7	0	8.4
K ₃	60	0	8	6.2
K ₄	50	8	0	11.3
K ₅	60	0	6	7.8
K ₆	50	0	13	3.0
K ₇	50	0	15	3.6
K ₈	40	0	16	22.8
K ₉	40	12	0	19.5
K ₁₀	80	15	0	7.3
K ₁₁	60	0	10	2.3
K ₁₂	60	6	0	3.2
K ₁₃	60	2	0	1.4

根据以上数据,计算提出策略一、策略二、策略三。

2.2 策略一——仅考虑常规寿命

策略一为传统策略,指仅考虑发动机按照常规寿命进行排序,形成发动机使用顺序进行寿命控制。

2.3 策略二——考虑一种状态寿命

使用变量: R_{LCP}, C_{LCP} 或 T_{LCP}

$$R_{LCP} = Y_{RLC} \div R_L = Y_{RLC} \div Z_{L3} \times P_N$$

$$T_{LCP} = Y_{TLC} \div T_L =$$

$$\sum_{i=1}^{13} [(T_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}] \div (Z_{L2} \times P_N)$$

通过数学计算得出常规寿命 x_1 和状态寿命 x_2 的权重。得到策略公式:

$$y = 0.3041x_1 + 0.6959x_2$$

或

$$y = 0.4098x_1 + 0.5092x_3$$

策略二表示为发动机常规寿命消耗量与发动机常规寿命的比值,比上发动机状态寿命消耗量与发动机状态寿命的比值,所得到的最终比值来进行发动机选择。即最终比值尽可能地接近发动机常规寿命的权重比上发动机状态寿命的权重 0.3041/0.6959 或 0.4098/0.5092。

2.4 策略三——考虑多种状态寿命

使用变量: $R_{LCP}, C_{LCP}, T_{LCP}$

$$R_{LCP} = Y_{RLC} \div R_L = Y_{RLC} \div Z_{L3} \times P_N$$

$$T_{LCP} = Y_{TLC} \div T_L =$$

$$\sum_{i=1}^{13} [(T_{LC_i} \times T_{A_i} \times Y_{RLC}) \div S_{TF_i}] \div (Z_{L2} \times P_N)$$

通过数学计算得出常规寿命 x_1 、 Z_1 状态寿命 x_2 和 Z_2 状态寿命 x_3 的权重。得到策略公式:

$$y = 0.2312x_1 + 0.5289x_2 + 0.2399x_3$$

策略三表示为发动机常规寿命消耗量与发动机常规寿命的比值,比上发动机 Z_1 状态寿命消耗量与发动机 Z_1 状态寿命的比值,所得到的最终比值 1 和发动机常规寿命消耗量与发动机常规寿命的比值,比上发动机 Z_2 状态寿命消耗量与发动机 Z_2 状态寿命的比值,所得到的最终比值 2,综合考虑来进行发动机选择。即最终比值 1 尽可能地接近发动机常规寿命的权重比上发动机 Z_1 状态寿命的权重 0.2312/0.5289; 最终比值 2 尽可能地接近发动机常规寿命的权重比上发动机 Z_2 状态寿命的权重 0.2312/0.2399。

3 发动机控制策略仿真验证

Simio 3D 是基于 SimioLLC 在美国开发的“智能对象”技术的新一代三维仿真软件,它可以构建自动化的动态模型系统,使人们能够直观看到整个系统的运行过程,也可以在三维动画中呈现环境系统,使动画制作时模型更加生动和直观^[16]。为验证所提策略的可行性和合理性,本文应用 Simio 3D 软件进行建模和仿真。

3.1 仿真模型构建

发动机作为本文研究的主体,在基本使用单元仿真中很难单独作为一个实体来呈现,因此以飞机(发动机)作为飞机平台和发动机的综合体在仿真建模中存在。在 Simio 3D 仿真软件中建立一个 Source(发生器),用来模拟基本使用单元中飞机的补充;建立 4 个 Server(服务器),用来模拟飞机飞行过程中的四个基本步骤,即驶入机库、驶出机库、起飞、着陆;同时新建三个 Server(服务器),依次作为故障、定检、大修的模型;建立 Sink(销毁器)对飞机(发动机)报废、退役进行模拟;最后使用 Time Path(时间路径)将其连接起来,模拟飞行的基本过程。模型如图 4 所示。

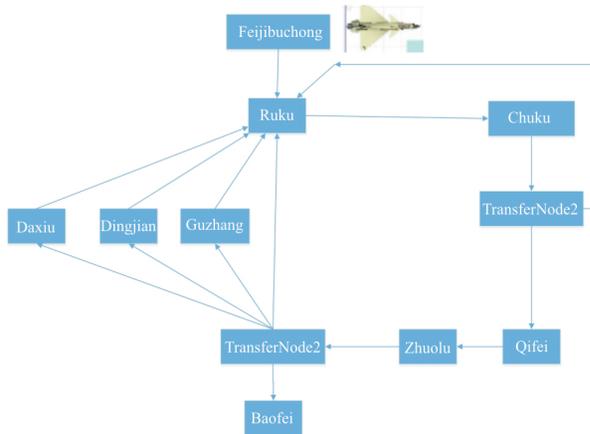


图 4 基本作战单元部分仿真
Fig. 4 Partial simulation of basic combat unit

在本次仿真模型中设置有 RenWuFeiXingShiJian、GuZhangShiJian、DaXiuShiJian、DaXiuShiJian2、DaXiuShiJian3、DingJianShiJian、BaoFeiShiJian、LuXianXuanZe、FJZT、ZTNur、CGSM、ZDZTSM、ZXLSM、ZDSMXH、ZXLSMXH 十五个实体参数。

3.2 寿命控制策略注入

将策略一注入模型进行路径的选择,在 TimePath3 上对飞机(发动机)按照常规寿命进行排序。点击 TimePath3 在 Entered 属性栏添加触发程序 TimePath3_Entered,在实体进入 TimePath3 时触发。选择 Processes 页面对 TimePath3_Entered 进行程序编辑,添加两个 Search 和两个 Assign,程序如图 5 所示。

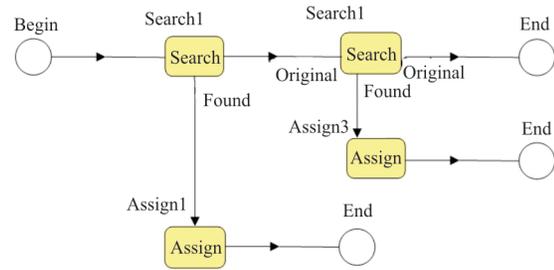


图 5 策略一 TimePath3_Entered 触发程序
Fig. 5 TimePath3_Entered trigger of strategy I

仿真策略参数设置为按照 Candidate. ModelEntity. CGSM 从大到小排列。

策略二、三注入模型的触发过程与策略一相同,仿真策略参数设置包括:总的常规寿命、Z₁的状态寿命和 Z₂的状态寿命,任务飞行时间、Z₁的状态寿命消耗和 Z₂的状态寿命消耗等。其中常规寿命和发动机 Z₁状态寿命的权重设置为 0.304 1、0.695 9。

在 TimePath 上注入考虑常规寿命、Z₁状态寿命和 Z₂状态寿命的发动机寿命控制策略。点击 TimePath3 在 Entered 属性栏添加触发程序 TimePath3_Entered,在实体进入 TimePath3 时触发,程序如图 6 所示。

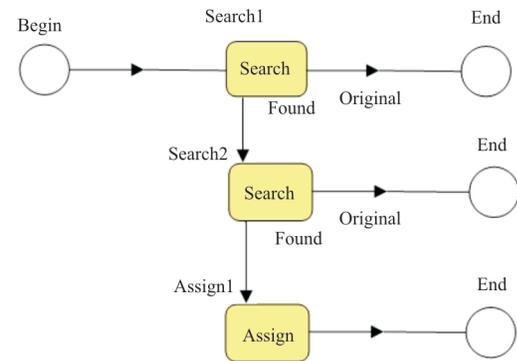


图 6 策略二/三 TimePath3_Entered 触发程序
Fig. 6 TimePath3_Entered trigger of strategy II / III

仿真实验中假定某单位在位飞机(发动机)数为 20 架,每天任务飞行架数为 12 架,任务飞行时间服从均值为 2 的均匀分布,最大任务时间为 2.5 h,最小任务时间为 1.5 h。在飞机(发动机)使用过程中设置排故、定检、大修 3 项基本保障工作和飞机(发动机)的退役报废工作。飞机(发动机)故障(综合考虑简单故障和一般故障)服从参数为 25 的指数分布,排故时间设为半天。飞机(发动

机)定检工作(规定为 100 h 定检,即当飞行小时数累加大于 95 h 时实施定检),定检工作所需时间为 5 天。飞机(发动机)大修工作(规定 1 000 h 大修,即飞行小时数累加大于 990 h 时实施大修),大修工作所需时间为 180 天。飞机(发动机)的退役报废时间规定为 31 000 h。

3.3 仿真结果分析

策略仿真数据如图 7 所示。

Projcr Model		Run Date:4/11/21 23:39	
Scenario :[Interactive Run]			
NumberAccumulated-Average			
Object Name	Data Source	Category	Value
TimePath2	[Travelers]	Content	0.001
TimePath3	[Travelers]	Content	0.00149
NumberAccumulated-Maximum			
Object Name	Data Source	Category	Value
TimePath2	[Travelers]	Content	2
TimePath3	[Travelers]	Content	1
NumberAccumulated-Minimum			
Object Name	Data Source	Category	Value
TimePath2	[Travelers]	Content	0
TimePath3	[Travelers]	Content	0
NumberCreated-Total			
Object Name	Data Source	Category	Value
ML	[Population]	Troughout	20
NumberDestroted-Total			
Object Name	Data Source	Category	Value
ML	[Population]	Troughout	0

图 7 策略仿真过程主要数据

Fig. 7 Main process datum of the simulation results

策略仿真分析结果如图 8~图 9 所示。

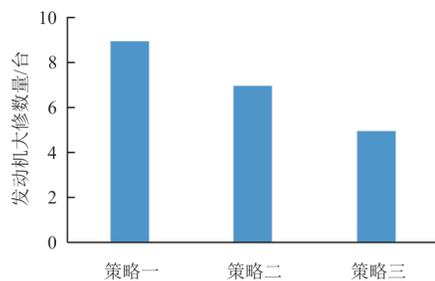


图 8 大修数量图

Fig. 8 Overhaul quantity

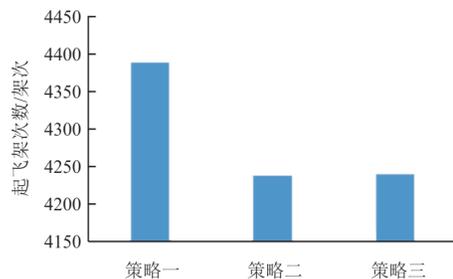


图 9 起飞架次图

Fig. 9 Takeoff sorties

从图 8 可以看出:在控制发动机寿命方面策略三优于策略一、策略二;策略二优于策略一。但考虑飞机起飞架次,从图 9 可以看出:在要求飞机出动架次方面策略一优于策略二、策略三。

4 结 论

根据数据分析,基于发动机状态寿命消耗的寿命控制策略,在减少发动机大修和合理安排发动机使用上优于传统的发动机寿命控制策略。而传统的发动机寿命控制策略在保证飞机(发动机)飞行架次上,优于基于发动机状态寿命消耗的寿命控制策略。因此在实际工作中,机务人员要综合考虑策略与作战/训练的匹配程度,进而选择合适的发动机寿命控制策略。同时,还需要在日常训练过程中,不断积累发动机使用与保障数据,更新、修正完善上述模型,提升策略的准确性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 杨兴宇,朱锐锋,郑小梅,等. 航空燃气涡轮发动机寿命消耗监测技术及应用[C]// 航空装备维修技术及应用研讨会. 烟台:中国航空学会,2015:843-849.
YANG Xingyu, ZHU Ruifeng, ZHENG Xiaomei, et al. Life consumption monitoring technology and application of aviation gas turbine engine[C]// Seminar on Aviation Equipment Maintenance Technology and Application. Yantai: CSAA, 2015: 843-849. (in Chinese)
- [2] 李本威,赵勇,蒋科艺,等. 典型使用条件对发动机涡轮叶片蠕变寿命消耗的影响研究[J]. 推进技术,2017,38(5):1107-1114.
LI Benwei, ZHAO Yong, JIANG Keyi, et al. Impact of typical operating conditions on creep life consumption for aero engine turbine blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(5): 1107-1114. (in Chinese)
- [3] 王永旗,徐可君,夏毅锐. 基于飞行参数的双发飞机发动机疲劳损伤差异分析[J]. 推进技术,2014,35(1):101-106.
WANG Yongqi, XU Kejun, XIA Yirui. Fatigue damage analysis of aeroengine in twin-engine aircraft based on flight parameters[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(1): 101-106. (in Chinese)
- [4] 曹明,王鹏,左洪福,等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理:现状、挑战与机遇——地面综合诊断、寿命管理和智能维护维修决策[EB/OL]. (2021-08-26)[2021-10-10]. <https://ie.cnki.net/kmobile/Journal/detail/XNYJ/HKXB20210825004>.

- CAO Ming, WANG Peng, ZUO Hongfu, et al. Civil aero-engine diagnostics & health management: current status, challenges and opportunities-comprehensive off-board diagnosis, life management & intelligent condition based MRO [EB/OL]. (2021-08-26)[2021-10-10]. <https://ie.cnki.net/kmobile/Journal/detail/XNYJ/HKXB20210825004>. (in Chinese)
- [5] 陈跃良, 张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 311-315.
CHEN Yueliang, ZHANG Yong. Considerations on the calendar life of military aircraft structures [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(4): 311-315. (in Chinese)
- [6] FU X, ZHONG S, ZHU J. Civil aeroengine health management and maintenance decision support system: development and application[C]// 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Los Angeles: AIAA, 2013: 4413.
- [7] CROCKER J, KUMAR U D. Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2000, 67(2): 113-118.
- [8] KLEEMAN M P, LAMONT G B. Solving the aircraft engine maintenance scheduling problem using a multi-objective evolutionary algorithm [C] // International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 782-796.
- [9] 陈少龙, 袁航. 浅谈机队发动机换发计划管理[J]. 航空维修与工程, 2016(5): 70-72.
CHEN Shaolong, YUAN Hang. On the management of fleet engine replacement plan[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2016(5): 70-72. (in Chinese)
- [10] 李琨, 汤利春. 怎样合理制定飞机的梯次使用计划[J]. 航空维修与工程, 2010(4): 18-19.
LI Kun, TANG Lichun. How to reasonably formulate the echelon use plan of aircraft [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2010(4): 18-19. (in Chinese)
- [11] 甘晓华, 李伟. 现役航空发动机使用寿命确定和控制方法[J]. 航空工程进展, 2010, 1(2): 103-106.
GAN Xiaohua, LI Wei. A summary of military aero-engine life determination methods [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(2): 103-106. (in Chinese)
- [12] 赵永, 姚连钰, 李松维, 等. 直升机红外成像仿真模型研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(34): 209-211.
ZHAO Yong, YAO Lianyu, LI Songwei, et al. Simulation model for IR imaging for the helicopter [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(34): 209-211. (in Chinese)
- [13] 丛继平, 崔利杰, 丁刚, 等. 基于目标驱动的航空维修保障体系仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(9): 2157-2165.
CONG Jiping, CUI Lijie, DING Gang, et al. Simulation on aviation maintenance support system based on goal-driven [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(9): 2157-2165. (in Chinese)
- [14] 杜茵. 智能化生产车间建模与Simio仿真[D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.
DU Yin. Modeling and Simio simulation of intelligent production workshop [D]. Liuzhou: Guangxi Science and Technology University, 2019. (in Chinese)
- [15] 吴鼎新, 周桂良, 毛丽娜, 等. Simio仿真系统在集装箱运输教学中的应用[J]. 物流工程与管理, 2016(10): 154-156.
WU Dingxin, ZHOU Guilang, MAO Lina, et al. Simulation teaching in the container transportation with Simio [J]. Logistics Engineering and Management, 2016(10): 154-156. (in Chinese)
- [16] 黄庚保. 生产系统建模与Simio仿真[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.
HUANG Gengbao. Production system modeling and Simio simulation [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [17] BOUSDEKIS A, MAGOUTAS B, APOSTOLOU D, et al. Review, analysis and synthesis of prognostic-based decision support methods for condition based maintenance [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(6): 1303-1316.
- [18] 张华, 武志刚, 李春权. 某型发动机寿命消耗特点研究[J]. 空军装备, 2020(4): 57-59.
ZHANG Hua, WU Zhigang, LI Chunquan. Study on the life consumption characteristics of an engine [J]. Air Force Equipment, 2020(4): 57-59. (in Chinese)

作者简介:

- 崔利杰**(1979—),男,博士,副教授。主要研究方向:装备体系保障性分析与评估。
- 李皓祥**(1998—),男,学士,助理工程师。主要研究方向:装备使用保障和维修管理。
- 李 薛**(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:装备体系保障性分析与评估。
- 童 奇**(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:装备体系保障性分析与评估。

(编辑:马文静)