

文章编号: 1674-8190(2023)04-124-13

特定情景下的航空发动机企业维修保障策略研究

周锐^{1,2}, 彭尚书¹, 李宇扬¹, 王晓东³, 吴博傲¹, 刘喜宁³, 雷泰然¹

(1. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 厦门 361102)

(2. 福建省能源材料科学与技术创新实验室, 厦门 361005)

(3. 中国航空发动机集团有限公司 生产部, 北京 100097)

摘要: 影响航空发动机维修保障(MRO)成效和成本的要素众多且关系复杂, 而当前对企业在特定情景下维修策略优化的研究较少。为了揭示影响维修保障流程的要素关系, 满足企业实际应用的需求, 对流程中的流程主体、飞行时间统计环节、人力资源环节、维修成果评价环节和成本环节进行系统建模, 利用系统动力学原理和灰狼优化算法并借助 Vensim、Matlab 等工具对企业人力资源质量调控和以性能为导向的两种实际应用情景进行优化策略分析, 阐释所关注因素之间的相互影响规律。综合各因素对航空发动机维修过程的实际影响, 本文所建立的模型和得到的最优维修流程策略具有较好的实用性和普适性。

关键词: 维修保障策略; 人力资源质量; 装备性能; 系统动力学模型; 灰狼优化算法

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.14

Study on maintenance, repair and operation strategy of aeroengine enterprise in specific scenarios

ZHOU Rui^{1,2}, PENG Shangshu¹, LI Yuyang¹, WANG Xiaodong³, WU Boao¹,
LIU Xining³, LEI Tairan¹

(1. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

(2. Innovation Laboratory for Sciences and Technologies of Energy Materials of
Fujian Province, Xiamen 361005, China)

(3. Production Department, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China)

Abstract: There are numerous factors influencing aeroengine maintenance, repair and operation (MRO) quality and cost, where their relationship is complicated, and the research focused on maintenance optimization under specific scenarios of aeroengine maintenance enterprises is quite limited. In order to clarify the relationship between the factors affecting maintenance guarantee process, the MRO process is systematically modeled, including main body of procedure, flight time statistics, human resources, performance evaluation and maintenance cost. Two practical application scenarios of enterprise including human resource quality control and performance oriented are investigated by using the principle of system dynamics and grey wolf optimization algorithm assisted by Vensim and MATLAB, which reveals the importance of human resource quality, employee satisfaction and planned maintenance. In consideration of the actual impact of various factors on aeroengine maintenance, the established model and obtained optimal maintenance process strategy is feasible and effective.

Key words: maintenance, repair and operation strategy; human resource quality; equipment performance; system dynamics model; grey wolf optimization algorithm

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(62175203); 福建省科技计划工业引导性重点项目(2020H0006)

通信作者: 周锐, rzhou2@xmu.edu.cn

引用格式: 周锐, 彭尚书, 李宇扬, 等. 特定情景下的航空发动机企业维修保障策略研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 124-136.

ZHOU Rui, PENG Shangshu, LI Yuyang, et al. Study on maintenance, repair and operation strategy of aeroengine enterprise in specific scenarios[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 124-136. (in Chinese)

0 引言

随着我国航空产业的快速发展,作为“心脏”的航空发动机面临着维修能力、效率、成本的挑战,当前主要的问题集中在产品服务保障的管理理念、维修技术、标准体系、人才结构等多个方面。目前我国航空维修产业的发展还有较大的提升空间,面对日益激烈的竞争和航空企业经营利润持续偏低的问题,航空发动机生产制造企业需要在保证航空维修质量的前提下,合理降低维修成本并提高效益,以增强公司的核心竞争力。同时,当企业人力、物力以及技术等资源受限时,可能引起维修后性能不足,无法达到理想的设备状态,为下一次故障埋下隐患,影响着生产制造企业的成本规划和可持续发展,一定程度上还造成了对外包维修的依赖。因此,成本控制和维修性能提升已经成为航空发动机生产制造企业非常重要的战略任务,也促使研究者去思考 and 探索新的维修管理方法,促进维修保障工作的流程优化,帮助航空维修产业科学发展,尤其是针对维修企业资源有限、维修后性能不足等情况的讨论和优化显得十分必要。

虽然国内对航空维修思想和技术体系的研究起步较晚,但是关于维修决策模型和流程优化的研究近些年也在日渐增多。左洪福等^[1]基于比例风险模型提出了航空发动机视情维修决策,从成本和可用度两方面对最优维修决策进行深入分析;汤新民^[2]基于Petri网研究了航空发动机车间维修过程建模及其应用,进行了资源冲突情况下的Petri网建模,并采用了粒子群算法优化了资源分配;张光宇等^[3]在航空装备维修流程逻辑分析的基础上,建立了机务实际工作中更换飞机发动机流程的Petri网;陈浩等^[4]引入“机会维修阈值”概念,运用马尔可夫决策过程理论,提出了一种基于状态的多部件系统非周期预防性维修计划的优化方法;孙见忠等^[5]基于蒙特卡洛仿真提出了一种航空发动机全寿命周期维修概率建模方法。相比而言,国外在航空维修方面的研究起步较早,研究内容比较全面,具有较好的借鉴意义,R. Bris等^[6]通过将预防维修的成本最小化,实现了高效决策优化;D. Banjevic等^[7]建立了基于单部件系统的连续退化过程模型,且应用该模型对最优的预防性维修阈值和检查间隔进行了求解;Lu S等^[8]将卡尔曼

滤波应用到连续退化的系统进行迭代建模,用于预测将来的劣化状态并实现了维修费用的最小化,验证了该维修决策的可行性;A. Jakub等^[9]利用本体和结构概念模型实现安全航空维修和大修中的数据管理组织。但是,目前国内外的研究大多针对航空维修的退化过程和预测优化,缺少针对维修企业在特定场景(维修资源有限,以维修性能为导向等)之下的成本和维修性能分析。

当前国内外主流的航空维修建模研究主要都是基于统一建模语言(Unified Modeling Language,简称UML),如Petri网等,并参照一定的技术,如故障预测和健康管理(Prognostics and Health Monitoring,简称PHM),来分析和设计航空维修的流程。这种建模分析方法对于建立一个新的维修体系以及系统性地分析维修流程有很大的优势,但是对于已有维修体系的改进和最优化的作用有限,不能满足要求^[10]。因此,需要一种新的方法来有效、快速地分析及优化已有的航空维修流程,而基于系统动力学原理的模型正好满足了这一需求。

系统动力学模型(System Dynamics,简称SD)是一种将功能、历史、结构相结合的借助计算机仿真进行定量非线性、多重反馈、复杂时变研究的系统分析技术。SD加强了与最优化技术应用、参数估计、灵敏度分析、结构稳定性分析、系统科学、控制理论等方面的联系,在能力评估、安全管理和库存管理等众多领域广泛应用。

本文基于系统动力学原理和Vensim、Matlab等工具,针对维修质量评价和成本控制对航空维修流程进行建模,并基于灰狼优化算法寻找最优维修流程策略,提出在维修资源有限和维修性能为导向两种情景下对航空发动机维修策略优化的建议,实现对维修保障工作的流程优化,以期为航空发动机生产制造企业的维修保障策略制定提供有价值的研究方法。

1 航空维修流程模型

航空发动机维修任务来源是多样化的,包括计划维修、视情维修、非计划维修以及适航文件(AD/SB)等。为了建立有效的简化模型,本文将除计划性维修之外的其他维修情况简化为故障性维修。在实际应用情况下,企业只需要将数据库

中除计划性维修外发动机的平均维修频率视作本文的故障性维修频率即可取得相同的结果。

航空发动机维修的系统动力学模型分为五个部分,包括流程主体、飞行时间统计环节、人力资源环节、维修成果评价环节和成本环节。流程主体部分映射维修的各个环节随时间的变化情况;飞行时间统计环节用于统计发动机的平均使用时间等,用以计算送修和报废的发动机数量;人力资源环节是影响维修效率的最灵活、最重要的部分,影响流程主体中的维修生产力;维修成果评价环节和成本环节用于综合评价维修流程。系统动力学模型的五个部分之间的关系如图 1 所示。

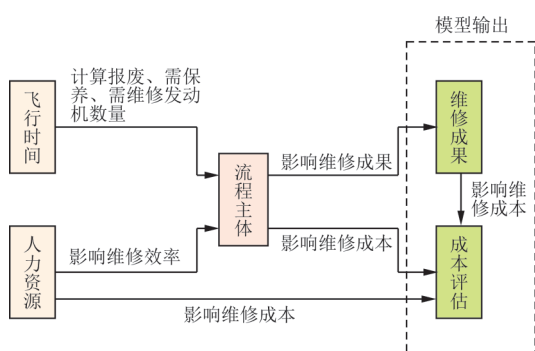


图 1 航空发动机维修流程关系

Fig. 1 Aeroengine maintenance process relationship

航空发动机维修的大致流程较为清晰(如图 1 所示),各个环节的影响因素已经经过多年的研究,其因果关系非常适合用系统动力学模型体现。运用系统动力学理论,建立完整的航空发动机维修流程模型,可以在其基础上分析各要素的影响关系和影响程度,在一定的条件下确定最优的输入组合,给维修体制的改进提供一定的决策依据。

Vensim 是一款经典的系统动力学建模软件,在 Vensim 的环境下,可以较为清晰地展示各个环节因素之间的影响关系和表达式。基于 Vensim,综合对航空发动机维修流程的研究,对航空维修的五个环节进行细致的建模,得到系统动力学模型。

1.1 飞行时间

本模型中,发动机的报废、故障和需要保养的状态根据统计到的平均时间模拟形成。模型中有两个变量参与发动机使用时间的统计,分别是用于判断发动机是否故障或需要保养的累计飞行时间和用于判断是否报废的总累计飞行时间。发动

机的运行会使飞行时间和总累计飞行时间增加,发动机的保养和维护会使累计飞行时间减少,与总累计飞行时间无关,只有发动机的报废可以减少总累计飞行时间。航空发动机维修模型飞行时间环节的 Vensim 系统动力学建模如图 2 所示。

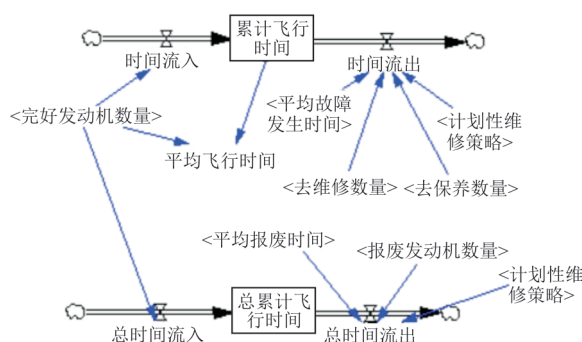


图 2 航空发动机维修模型飞行时间环节

Fig. 2 Flight time block of aeroengine maintenance model

综合上述描述,时间统计环节的关键环节表达式如下:

时间流入=完好发动机数量

时间流出=去保养数量×计划性维修策略+去维修数量×平均故障发生时间

累计飞行时间=上一循环累计飞行时间+时间流入-时间流出

总时间流入=完好发动机数量

总时间流出=报废发动机数量×平均报废时间×计划性维修策略/10

总累计飞行时间=上一循环总累计飞行时间+总时间流入-总时间流出

平均飞行时间=累计飞行时间/完好发动机数量

在整个飞行时间模型中,各个要素与流程主体通过完好发动机数量、计划性维修策略等联系起来,所有的要素都无法调控,是影响模型输入输出关系的一个中间环节。

1.2 人力资源

在影响维修生产力的各个因素中,人力资源的灵活性较强,在短期内相对比较容易调整,因此本文将作为重点环节进行建模。设施硬件资源的改善一般需要巨大的投入,已有的设施使用具有很强的连贯性,暂时不作为模型的重点讨论内容。

人力资源环节通过人员的离职、返岗、雇佣环

节仿真,使得人力资源数量处在动态的变化当中,体现了航空发动机维修过程之中生产力的波动。航空发动机维修模型人力资源环节的 Vensim 系统动力学建模如图 3 所示。

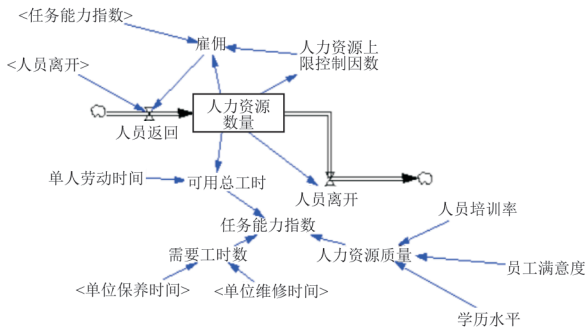


图 3 航空发动机维修模型人力资源环节
Fig. 3 Human resource block of aeroengine maintenance model

人力资源环节的关键环节表达式(INTEGER 为取整函数,IF THEN ELSE(A, B, C)的含义为如果满足 A,则值为 B,否则为 C)如下:

人力资源质量=(人员培训率+学历水平)×员工满意度

雇佣=IF THEN ELSE(任务能力指数>1;OR:人力资源数≤25,人力资源数量×0.12×人力资源上限控制因素,0)

人员返回=人员离开×0.12+雇佣

人员离开=IF THEN ELSE(人力资源数量≥25,人力资源数量×0.08,人力资源数量×0.04)

人力资源数量=上一循环人力资源数量+人员返回-人员离开

可用总工时=人力资源数量×单人劳动时间

任务能力指数=可用总工时/需要工时数×人力资源质量/15

在本模型中,人力资源的数量不是一个可以灵活调整的参数,而是通过人力资源上限控制因素和任务能力指数等决定。这是由于对于企业,员工的数量无法在很大范围内进行调控,较理想的情况是根据维修任务的多少和维修能力的高低来确定人力资源的数量。而人力资源的质量则可以灵活调节,通过改变员工待遇、培训计划、招聘计划等,就可以对人员培训率、员工满意度、学历水平等进行调整,从而影响人力资源质量,也可以间接影响到人力资源的数量。因此,人员培训率、

员工满意度和学历水平被设定为人力资源模型部分的输入参数。

1.3 维修成果

本环节主要用于评价计划性维修的成果。本文选取三个参数作为维修航空发动机的成果参数:高压涡轮转子振动幅度、排气温度裕度和滑油温度^[11-13]。这三个性能指标不仅能够直接体现发动机的性能,还与维修的成本息息相关。值得注意的是本模型当中采用的维修成果评价公式并不是固定不变的,根据具体的要求和实际发动机的型号,可以对此公式进行适当调整。另外,为了直观分析各性能参数的影响,本文中的高压涡轮转子振动幅度、排气温度裕度和滑油温度参数均取相对数值,性能越优秀数值越大。航空发动机维修模型维修成果评价环节的 Vensim 系统动力学建模如图 4 所示。

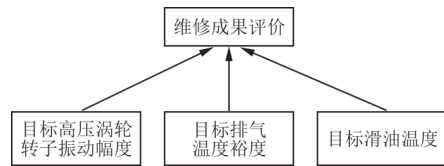


图 4 航空发动机维修模型维修成果评价环节
Fig. 4 Maintenance achievement evaluation block of aeroengine maintenance model

维修成果评价的结果如下:

维修成果评价=目标排气温度裕度+目标滑油温度+目标高压涡轮转子振动幅度

需要注意的是,在大部分分析中,将三个参数相加作为维修成果评价不会影响最终的结论,但研究某项具体发动机性能指标时,可能会由于排气温度裕度、滑油温度和高压涡轮转子振动幅度对性能的影响程度不同而产生误差。实际应用本模型时,三个参数的权重值需要根据发动机型号和企业维修的实际数据进行确定。

对于航空维修成果的评价,本文以目标排气温度裕度、目标滑油温度和目标高压涡轮转子振动幅度为指标。这是三个相对灵活的参数,只要有足够的维修能力,就可以将维修后的高压涡轮转子振动幅度、排气温度裕度和滑油温度各自提升到较高的水平,但这样需要耗费的成本会较高。而放低对这三个参数的要求,则可以在一定程度上降低成本。由于这种规律,这三个参数被定为

可以调整的模型输入参数。而最终得到的维修成果评价,则是评价发动机维修环节的重要因素,作为输出参数。

1.4 流程主体

航空发动机的维修一般分为故障性维修和计划性维修。计划性维修是指在未发生故障时进行的维修,即通常所说的保养。影响计划性维修进行与否的影响因素是管理策略,通常较为灵活。在本模型中,将计划性维修策略简单等效为一台发动机送往保养的平均时间,便于分析。

由于维修和保养的情况会影响发动机的使用寿命,从而影响新发动机的购买和购买发动机的成本。为了考虑这方面的影响,主体维修环节中除了故障性维修和计划性维修的部分,还加入了发动机的报废和购买环节。

流程主体的 Vensim 系统动力学建模如图 5 所示。

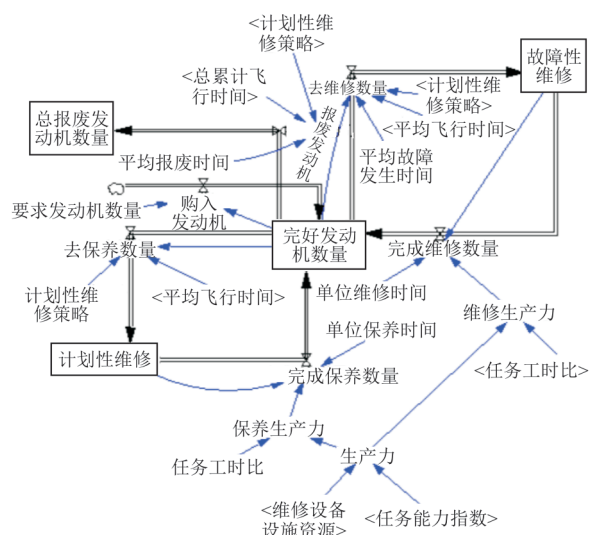


图 5 航空发动机维修流程主体

Fig. 5 Main body of aeroengine maintenance process

值得注意的是,历史数据对模型中的公式有重要的影响。在本文使用虚拟数据的情况下,只能对模型进行大致的分析,不能给出详细的优化方案。如果将模型投入到某个企业或某个维修基地的实际维修优化中,需要输入企业以往的历史数据,例如发动机的平均报废时间、平均故障发生时间等,模型才能更加与实际情况相符。

模型中关键环节的表达式如下:

完成维修数量=INTEGER[IF THEN ELSE (故障性维修≤故障性维修×维修生产力/单位维

修时间,故障性维修,故障性维修×维修生产力/单位维修时间)]

完成保养数量=INTEGER[IF THEN ELSE (计划性维修≤计划性维修×保养生产力/单位保养时间,计划性维修,计划性维修×保养生产力/单位保养时间)]

去维修数量=INTEGER {IF THEN ELSE [完好发动机数量≤完好发动机数量×平均飞行时间/平均故障发生时间,完好发动机数量,完好发动机数量×平均飞行时间/(平均故障发生时间+1.5×计划性维修策略)]}

去保养数量=INTEGER[IF THEN ELSE (完好发动机数量≤完好发动机数量×平均飞行时间/计划性维修策略,完好发动机数量,完好发动机数量×平均飞行时间/计划性维修策略)]

报废发动机数量=INTEGER(总累计飞行时间/平均报废时间×计划性维修策略/10)

购入发动机数量=IF THEN ELSE(完好发动机数量<要求发动机数量,要求发动机数量-完好发动机数量,0)

完好发动机数量=上一循环完好发动机数量+完成保养数量+完成维修数量+购入发动机数量-去保养数量-去维修数量-报废发动机数量

在流程主体所有的要素当中,大多数都是无法改变的客观参数,例如要求发动机数量、平均故障发生时间等。在模拟的时间内,这些参数无法灵活改变,因此不作为输入参数。在流程主体中,能够灵活调整的参数只有计划性维修策略和任务工时比。这两个参数反映的是计划性维修的频率和计划性维修占用所有维修资源的比例,通过管理层面的手段就可以灵活调整。因此,将这两个参数作为模型的输入参数。

1.5 成本评估

考虑航空企业在发动机上花费的总成本,主要可以分为以下五个部分:发动机的运行成本、购入发动机的成本、人力资源成本、保养发动机成本、维修发动机成本。本模型重点讨论发动机的保养成本。

与维修成果评价的环节类似,具体企业和不同发动机型号的各项成本并不相同,具体数值需要根据具体情况进行更改。航空发动机维修模型成本环节的 Vensim 系统动力学建模如图 6 所示。

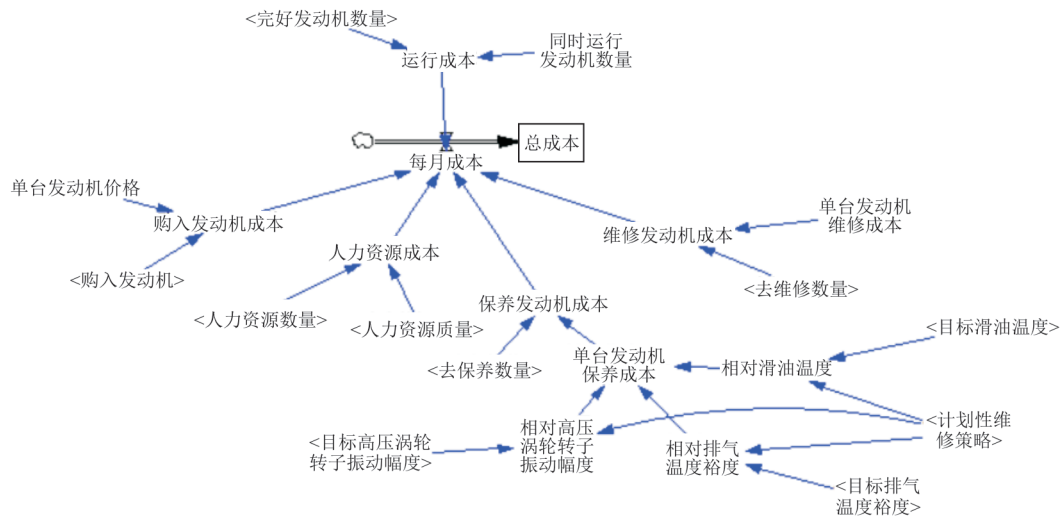


图6 航空发动机维修模型成本环节

Fig. 6 Cost block of aeroengine maintenance model

成本环节的关键环节表达式如下:

单台发动机保养成本=447.81×相对排气温度裕度×相对排气温度裕度+187 228×相对滑油温度+45 353×相对高压涡轮转子振动幅度-101 033

每月成本=发动机保养成本+发动机维修成本+发动机购入成本+运行成本+人力资源成本

总成本=上一循环总成本+每月成本

在模型模拟的迭代时间内,可以计算得到这期间的总成本。总成本是评价发动机维修的重要依据,在维修成果相同的情况下,总成本越低意味着发动机维修的流程越优化。

完整的模型中,输入变量为计划性维修策略、任务工时比、人员培训率、员工满意度、学历水平、目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度、目标滑油温度。输出变量为总成本和维修成果评价,为了方便后续的分析,由于维修评价高低与总成本成负相关,与维修成果评价成正相关,本文将模型输出归一化为总成本/维修成果评价。通过模型的建立,取得了输入与输出的一一对应关系。

本文模拟分析的发动机总数量均为100台。根据发动机型号和维修条件的不同,模型当中的一些参数需要进行一些调整,但是整体的模型体系是较为完善的。通过分析模型输入输出之间的关系,可以得出一些比较通用的结论。

2 基于实用情形的模型优化分析

2.1 灰狼优化算法

模型建立后,需要探讨如何对模型进行优化

和分析。由于Vensim只能简单地查看输出与输入的对对应关系,不具备复杂的数学分析功能,而本模型的输入关系复杂,用简单的数学分析难以进行优化,还需要一种优化算法作为分析模型的工具。

本文建立的模型中,输入参数有八个,分别为任务工时比、计划性维修策略、人员培训率、员工满意度、员工学历水平、目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度、目标滑油温度。输出参数有两个,分别为维修成本和维修成果评价。由于输入输出之间的关系并不明确,且考虑到模型进一步完善细化之后会更加难以直接对输入输出的关系进行分析,对于模型的优化本文使用灰狼优化算法作为工具。

灰狼优化(Grey Wolf Optimization,简称GWO)算法由S. Mirjalili等^[14]于2014年提出,是一种新兴的差分进化算法,通过模拟灰狼群体捕食行为,基于狼群群体协作的机制来达到优化的目的,具有简单高效的特点,在单峰函数和多模态函数下均拥有较好的性能,在大多数测试函数下优于粒子群优化(PSO)算法、引力搜索算法(GSA)和差分进化(DE)算法^[14]。

GWO的原理是在一个模型的输入输出对应关系完全确定时,首先,在 n 个输入对应的 n 维输入域当中随机选若干个点,为灰狼的位置,并计算所有灰狼对应的输出,取输出最优的三头灰狼分别为 α 、 β 、 δ ,其余为普通灰狼。然后,根据 α 、 β 、 δ 的位置和算法的参数,其余灰狼移动至新的位置,并计算对应的输出值。若出现了输出值比 α 、 β 、 δ 更优的灰狼,则更新 α 、 β 、 δ 的位置至最优位置,原

有位置更改为普通灰狼。最后,再进行灰狼位置的更新,不断迭代,直到达到最大迭代次数。其流程如图 7 所示。

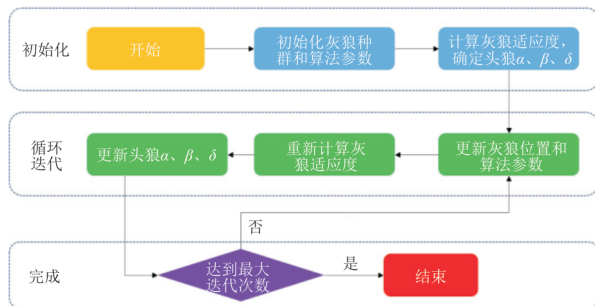


图 7 灰狼优化算法流程图

Fig. 7 Flow chart of grey wolf optimization algorithm

通过 Matlab 编程对已有模型进行优化,其需要的输入量如下:

各输入参数下限: $l_b = [\text{任务工时比, 计划性维修策略, 人员培训率, 员工满意度, 员工学历水平, 目标高压涡轮转子振动幅度, 目标排气温度裕度, 目标滑油温度}]$ 。

各输入参数上限: $u_b = [\text{任务工时比, 计划性维修策略, 人员培训率, 员工满意度, 员工学历水平, 目标高压涡轮转子振动幅度, 目标排气温度裕度, 目标滑油温度}]$ 。

本文模型的各个输入参数中,任务工时比为维修小组进行计划性维修的时间占总工作时间的比例,取值范围为 0~1,无量纲;计划性维修策略为进行计划性维修的间隔,单位为周;人员培训率为年度参加培训的职工人次与企业职工总人数的比例,由于一名员工在一年中参与培训的次数有可能多于一次,人员培训率的取值可能大于 1;员工满意度为企业所有员工对企业的满意程度打 1~5 分,取平均数;员工学历水平为给学历水平是初中及以下员工赋值为 1,高中赋值为 2,专科赋值为 3,本科赋值为 4,研究生赋值为 5,取单位员工学历赋值的平均值;目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度、目标滑油温度由于缺少实际数据,采用了虚拟数据,均取 3 为最优值,0 为故障值,若在实际应用中引入航空维修公司的真实数据,则优化结果会更符合实际情况。由于维修评价高低与总成本成负相关,与维修成果评价成正相关,定义模型得到的输出结果为维修成本/维修成果评价,此参数为一无量纲数。本文的模拟时长为 100 周,总成本单位为 10 亿元,维修成果为 0~9 的无量纲数,模型输出值小于 0.2 时为较理想状态。

运用灰狼优化算法的目的就是得出在 l_b 和 u_b 限制下,输出结果最小的值及其对应的输入。

优化分析的 Matlab 程序主体流程如图 8 所示。

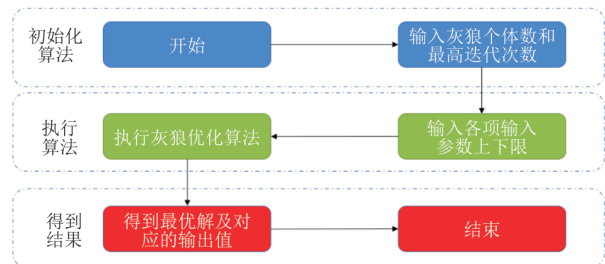


图 8 灰狼优化算法程序主体流程图

Fig. 8 Main flow chart of grey wolf optimization algorithm

2.2 人力资源质量调控

在开始相关的分析之前需要说明,本文采用的数据均为虚拟数据,数值的大小不具有实际物理意义,仅作为参考量纲,得到的结果仅具有参考价值,若要得到具备实用价值的分析结果,需要引入企业的实际数据。

最理想的情况下,当所有的输入量均可灵活变化时,即可以投入较多资源用于维修管理优化,各个上下限的设置情况: $l_b = [0.1, 3, 0.5, 0.5, 0.5, 0.8, 0.8, 0.8]$, $u_b = [0.9, 13, 3, 5, 5, 2.5, 2.5, 2.5]$ 。

此时最优化的结果如下: $[\text{任务工时比, 计划性维修策略, 人员培训率, 员工满意度, 员工学历水平, 目标高压涡轮转子振动幅度, 目标排气温度裕度, 目标滑油温度}] = [0.703\ 54, 9.135\ 3, 2.991\ 5, 2.738\ 3, 1.429\ 6, 1.378\ 9, 1.748\ 9, 0.8]$,输出结果为 0.153 71。

为了讨论人力资源质量参数对模型优化的影响,人员培训率、员工满意度和员工学历水平与各项优化结果的关系如图 9 所示,通过对各个人力资源质量参数的限制,可以得到在限制下其他优化参数的结果,从而展现人力资源质量参数对优化的影响。

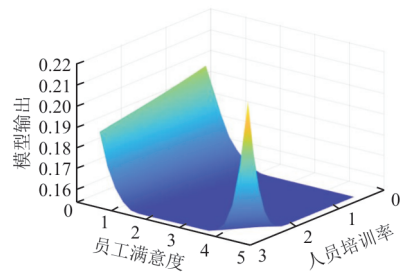
从图 9(a1)、图 9(b1)、图 9(c1)可以看出:当企业的人力资源质量较差时,随着人力资源质量参数的增大,模型输出显著减小;但当企业的人力资源质量较好时,模型输出减小较缓慢,甚至出现模型输出上升的情况。即三个人力资源质量参数的数值均较小时,员工满意度、人员培训率和员工学历水平的提高对于模型输出结果的优化有显著作

用,但是当员工满意度、人员培训率和员工学历水平需要提高到一个相当高的水平时,模型输出结果会变差。这是由于要使员工满意度、人员培训率和员工学历水平达到相当高的水平需要投入较高的成本。

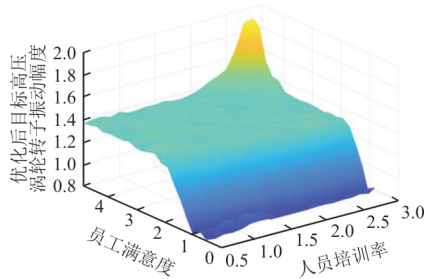
图 9(b1)中员工学历水平和员工满意度都较高时,随着两个参数的继续上升,模型的输出值快速上升,达到了 1 左右,远超过了图 9(a1)、图 9(c1)中的模型输出最大值。这种现象的原因是成本过高,如图 9(b5)所示,总成本的最大值远大于图 9(a5)和图 9(c5)中的值。这种超高的总成本是由于员工学历水平和员工满意度的最大值都为 5,而人员培训率的最大值为 3,导致员工学历水平和员工满意度的调整范围较大,对人力资源质量的影响程度也较大。要将员工的学历水平和满意度都提升到很高的值,需要投入巨量的成本,若两个参数都要提升至接近最大值 5,成本将不可控制。因此,一般的情况下并不考虑将企业的员工学历水平和员工满意度提升至过高水平。

从图 9(a2)、图 9(b2)和图 9(a3)、图 9(b3)可以看出:随着员工满意度和人员培训率或员工满意度和员工学历水平的上升,最优化的任务工时比增大,计划性维修的间隔时间缩短。这意味着投入计划性维修的资源增加,投入故障性维修的资源减少。这是由于人力资源水平较差的情况下,维修的质量无法得到保障,故障发生的概率会有所上升,与投入更多资源来保障计划性维修的频率相比,将资源投入故障性维修,确保故障性维修的效率可以更加高效地利用资源。人力资源水平较高的情况下,计划性维修的水平 and 效率都能得到很好的保障,将多数的资源集中到计划性维修当中,可以显著减少故障发生的次数,减少故障性维修的次数,从而降低成本。

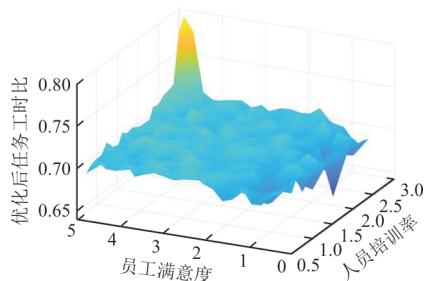
与图 9(a2)、图 9(b2)和图 9(a3)、图 9(b3)相比,图 9(c2)、图 9(c3)对应的人员培训率和员工学历水平提高时,也有任务工时比增大,计划性维修时间间隔减小的规律,但变化的幅度较小。这是由于模型设计时强调了员工满意度的作用,在模型的人力资源模块中,员工满意度对人力资源质量的影响大于人员培训率和员工学历水平。模型的这种参数设置是考虑到当人员培训率和员工学历水平比较高,但是员工的待遇未得到保障,导致员工满意度较差时,维修的质量和效率无法得到保证,从而导致维修成果评价较差,最优化的模型输出较差。



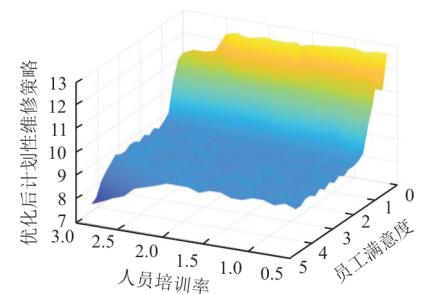
(a1) 员工满意度、人员培训率与模型输出的关系图



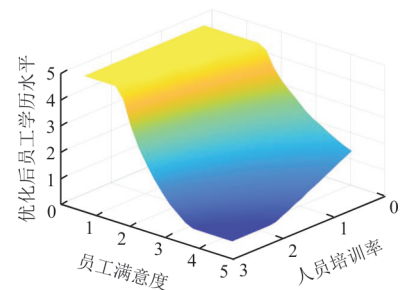
(a2) 员工满意度、人员培训率与目标高压涡轮转子振动的关系图



(a3) 员工满意度、人员培训率与任务工时比的关系图

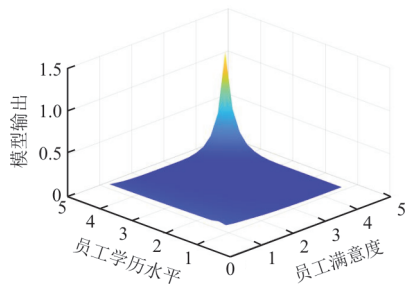


(a4) 员工满意度、人员培训率与计划性维修策略的关系图

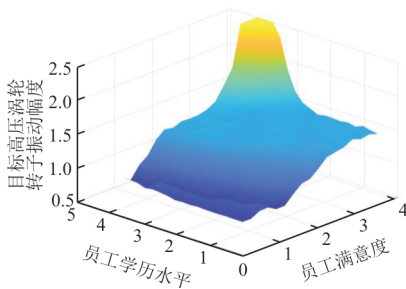


(a5) 员工满意度、人员培训率与员工学历水平的关系图

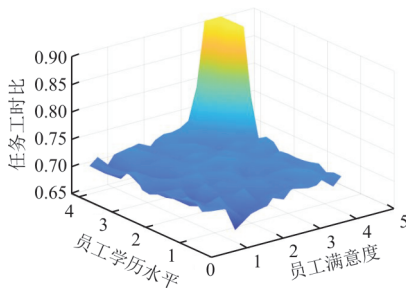
(a) 员工满意度和人员培训率的限制条件之下对优化的影响



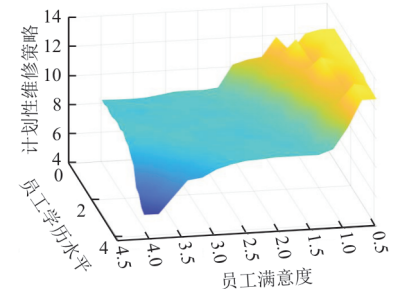
(b1) 员工学历水平、员工满意度与模型输出的关系图



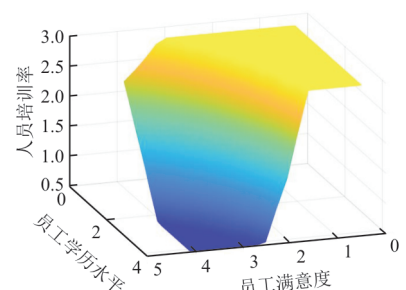
(b2) 员工学历水平、员工满意度与目标高压涡轮转子振动的关系图



(b3) 员工学历水平、员工满意度与任务工时比的关系图

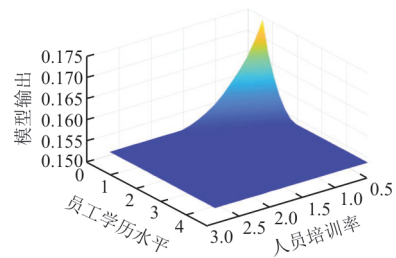


(b4) 员工学历水平、员工满意度与计划性维修策略的关系图

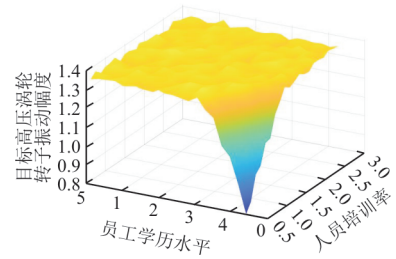


(b5) 员工学历水平、员工满意度与人员培训率的关系图

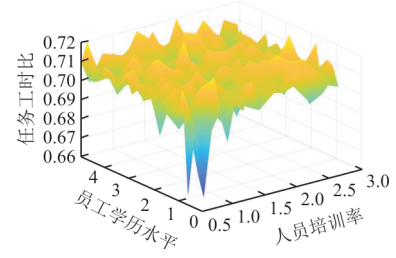
(b) 员工学历水平和员工满意度的限制条件之下对优化的影响



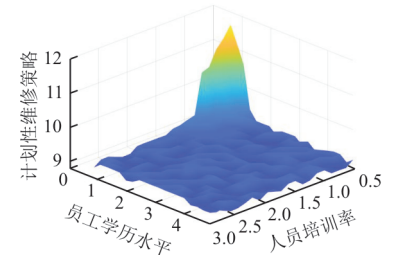
(c1) 员工学历水平、人员培训率与模型输出的关系图



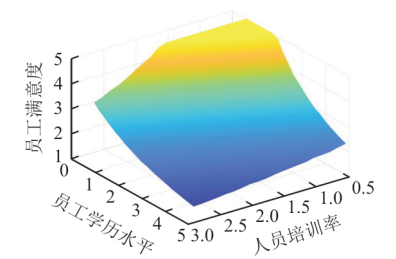
(c2) 员工学历水平、人员培训率与目标高压涡轮转子振动的关系图



(c3) 员工学历水平、人员培训率与任务工时比的关系图



(c4) 员工学历水平、人员培训率与计划性维修策略的关系图



(c5) 员工学历水平、人员培训率与员工满意度的关系图

(c) 员工学历水平和人员培训率的限制条件之下对优化的影响

图9 人员培训率、员工满意度和员工学历水平与各项优化结果的关系

Fig. 9 Relationship of optimization results with personnel training frequency, satisfaction degree, education level of employee

从图 9(a)和图 9(b)可以看出:员工满意度对优化后结果的影响较大,图 9(c)中不含有对员工满意度的调整,各个参数的变化曲面就比较平缓。这也是由于模型重视了员工满意度,使得员工满意度对其他要素的影响非常明显。在企业建设、运行当中,应该特别注重员工满意度的建设,尽可能提高员工待遇,包括精神层面和一定的物质层面,物质层面会对成本产生较直接的影响,因此精神层面的获得感和满意度可以一定程度上补充这方面的需求。这不仅对提升航空发动机维修的成果有着积极的作用,而且还有利于建立企业的口碑和企业形象,对于企业的长期发展有重要的意义。

2.3 维修成果要求

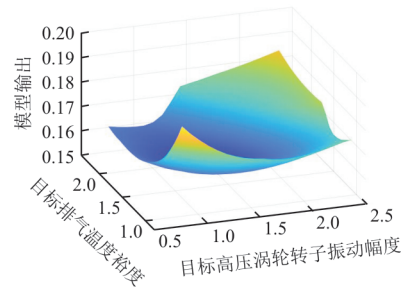
在航空维修企业对航空发动机进行维修时,存在另一种实际情况:使用者对发动机维修的成果(发动机性能)要求非常高,需要航空维修企业尽可能将发动机维修或保养至最好的状态。在这种情况下,目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度、目标滑油温度这三个发动机性能指标不再是可以灵活调整的参数,而是一组数值设定较大的定值。

例如: $l_0=[0.1, 3, 0.5, 0.5, 0.5, 2.5, 2.5, 2.5]$, $u_0=[0.9, 13, 3, 5, 5, 2.5, 2.5, 2.5]$ 。

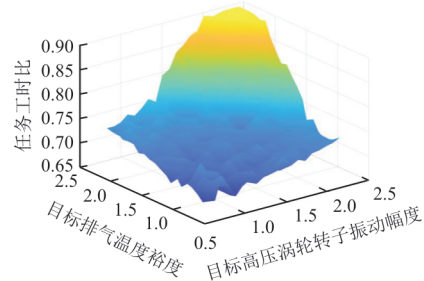
此时的最优化结果如下:[任务工时比,计划性维修策略,人员培训率,员工满意度,员工学历水平,目标高压涡轮转子振动幅度,目标排气温度裕度,目标滑油温度]=[0.9, 5.885 3, 2.518 6, 3.962, 0.769 98, 2.5, 2.5, 2.5],输出结果为 0.223。

这是一种比较极端的情况,目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度、目标滑油温度都取到了 2.5 这一极大值。在这种情况下,任务工时比达到了最大值,计划性维修的间隔时间较小,即将绝大部分的资源都投入了计划性维修中,才能在保证维修水平很高的情况下成本较低。

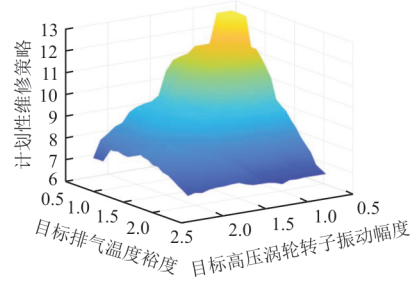
本文讨论具体的性能参数要求如何对优化结果产生影响。将维修后发动机的性能指标:目标高压涡轮转子振动幅度、目标排气温度裕度和目标滑油温度中的两个限制在定值时进行优化,其他参数的优化结果如图 10 所示。



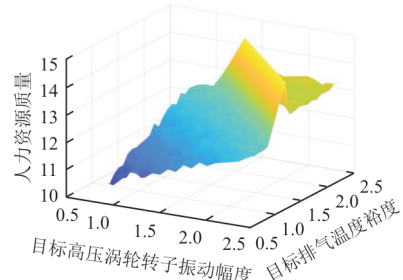
(a1) 目标排气温度裕度、目标高压涡轮转子振动幅度与模型输出的关系图



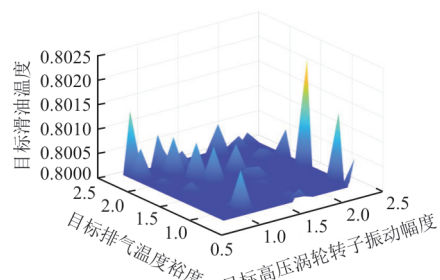
(a2) 目标排气温度裕度、目标高压涡轮转子振动幅度与任务工时比的关系图



(a3) 目标排气温度裕度、目标高压涡轮转子振动幅度与计划性维修策略的关系图

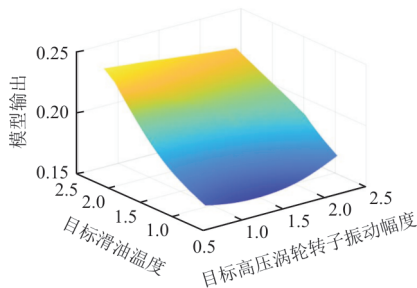


(a4) 目标排气温度裕度、目标高压涡轮转子振动幅度与人力资源质量的关系图

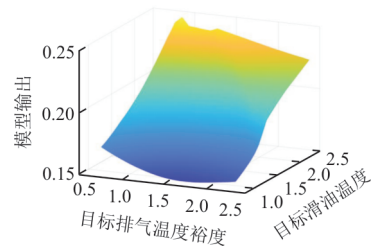


(a5) 目标排气温度裕度、目标高压涡轮转子振动幅度与目标滑油温度的关系图

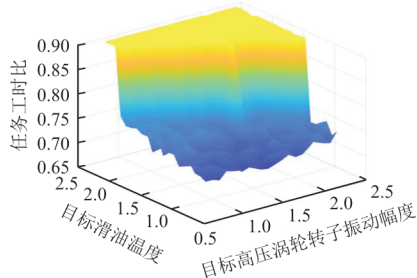
(a) 目标排气温度裕度和目标高压涡轮转子振动幅度的限制条件之下对优化的影响



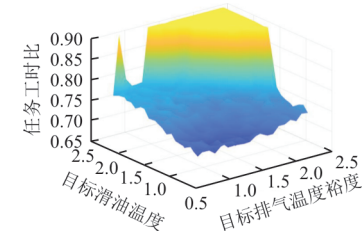
(b1) 目标滑油温度、目标高压涡轮转子振动幅度与模型输出的关系图



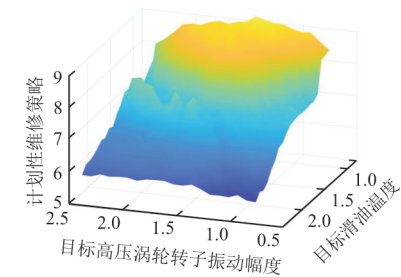
(c1) 目标排气温度裕度、目标滑油温度与模型输出的关系图



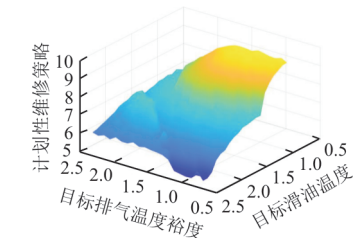
(b2) 目标滑油温度、目标高压涡轮转子振动幅度与任务工时比的关系图



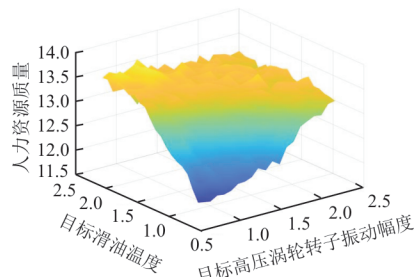
(c2) 目标排气温度裕度、目标滑油温度与任务工时比的关系图



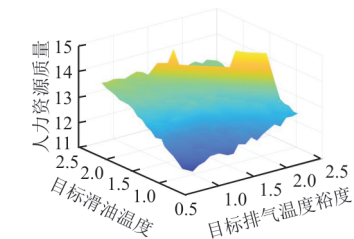
(b3) 目标滑油温度、目标高压涡轮转子振动幅度与计划性维修策略的关系图



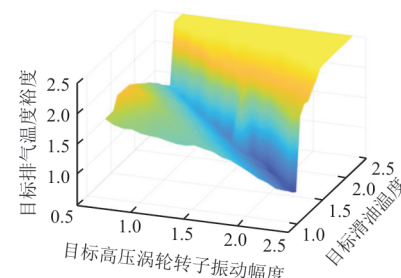
(c3) 目标排气温度裕度、目标滑油温度与计划性维修策略的关系图



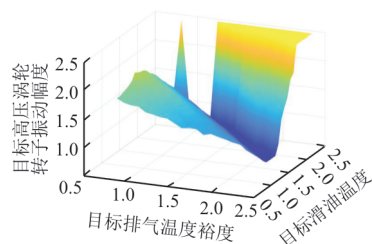
(b4) 目标滑油温度、目标高压涡轮转子振动幅度与人力资源质量的关系图



(c4) 目标排气温度裕度、目标滑油温度与人力资源质量的关系图



(b5) 目标滑油温度、目标高压涡轮转子振动幅度与目标排气温度裕度的关系图



(c5) 目标排气温度裕度、目标滑油温度与目标高压涡轮转子振动幅度的关系图

(c) 目标排气温度裕度和目标滑油温度的限制条件之下对优化的影响

(b) 目标滑油温度和目标高压涡轮转子振动幅度的限制条件之下对优化的影响

图 10 以性能为导向时发动机性能参数与各项优化参数的关系

Fig. 10 Relationship between engine performance and optimization parameters in performance-oriented scenario

从图10(a1)、图10(b1)、图10(c1)可以看出:随着各项维修成果评价参数的升高,模型优化后输出值会先降低后上升,存在一个模型输出值最低的点,这个点并非处在维修成果评价最低或最高的位置。这是由于当维修成果评价处于较低值时,发动机性能的提升对于模型输出的降低为主导,这时投入较小的成本,可以使维修成果得到较大的提升。这种情况在维修成果评价参数提升到一定值时发生了改变。当维修成果评价参数超过图10(a1)、图10(b1)、图10(c1)中模型输出的最低点对应值时,优化后的模型输出逐渐增大。这是由于对发动机性能要求很高时,如果继续提高要求,维修的成本会不可避免地快速上升,模型的输出无法通过成本的优化和发动机性能的提升弥补。企业维修以性能为导向时,需要衡量竞争强度、成本与效益,决定是否要以提高成本为代价,来提升维修的成果与同行进行竞争。

从图10(a2)、图10(a3)、图10(b2)、图10(b3)和图10(c2)、图10(c3)可以看出:随着各项维修成果评价参数的升高,计划性维修的任务工时增加、维修间隔时间缩短。这体现了计划性维修对于发动机性能的重要价值。频繁、高效的计划性维修可以保持发动机维持在高性能的状态,同时,相比于发生故障后对发动机进行全面大修,并且将发动机修复到完美的状态,计划性维修的成本较低,而且可以降低故障发生的概率。因此,当对发动机的性能要求较高时,应特别注重计划性维修的频率和效率。

从图10(a4)、图10(b4)和图10(c4)可以看出:整体上,随着各项维修成果评价参数的升高,优化后的人力资源质量逐渐升高。显然,人力资源的质量越高,维修的效果和效率越好,对应的维修成果评价参数就越高。但是,值得注意的是,三张图中都出现了最高点位置,当维修成果评价参数高于一定值时,优化后的人力资源质量反而有所下降。这部分变化出现的原因是当发动机性能要求极高时,维修成本快速上升,出于综合优化模型输出的考虑,人力资源质量有所下降可以适当地降低人力资源的成本,平衡过高的成本,使得最终取得的模型输出最佳。

从图10(a5)、图10(b5)和图10(c5)可以看出:随着维修成果评价参数的升高,最终的维修总成本逐渐升高。同样的,根据三张图中目标高压涡轮

转子振动幅度、目标排气温度裕度和目标滑油温度变化的剧烈程度不同,可以看出提升目标排气温度裕度需要的成本最低,提升目标高压涡轮转子振动需要的成本居中,提升目标滑油温度需要的成本最高。在企业实际维修流程中,维修的预期效果一方面需要根据需求的效果决定,另一方面也可以参照成本的高低排序,优先提升发动机的目标排气温度裕度和目标高压涡轮转子振动幅度,以节约成本。

3 结 论

1) 在维修企业资源不足的情况下,计划性维修的频率必然有所降低,此时应优先提升人力资源水平到当前的上限。

2) 员工的满意度是一项非常重要的指标,在资源不足的情况下,也应该尽量保证员工的满意度水平。

3) 在维修企业资源充足,以发动机维修后的性能为导向情况下,应将绝大部分的资源投入到计划性维修中,这样才能在保证维修水平较高的情况下成本较低。

4) 根据本研究中虚拟数据的分析,在各个维修性能参数中,滑油温度的提升是需要耗费最多成本的,在没有特殊要求的情况下,企业应优先提升发动机的目标排气温度裕度和目标高压涡轮转子振动幅度,以节约成本。

类似的分析方法可以在实际数据中应用推广来进行策略判定。以上优化建议是基于本文模型分析得出,实际生产中的维修流程和资源分配情况会由于发动机型号差异等现实条件限制,可能会与本文研究结论有出入。因此,采用本文的研究方法时需结合实际情况来调整研究模型中的具体参数,从而制定出有针对性的维修保障策略。

参 考 文 献

- [1] 左洪福,张海军,戎翔.基于比例风险模型的航空发动机视情维修决策[J].航空动力学报,2006,21(4):716-721.
ZUO Hongfu, ZHANG Haijun, RONG Xiang. Condition based aero-engine maintenance decision method using proportional hazards model[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 716-721. (in Chinese)
- [2] 汤新民.基于Petri网的航空发动机车间维修过程建模及其应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
TANG Xinmin. Aero-engine workshop maintenance proce-

- dure modeling based on Petri nets and its application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 张光宇, 张福光, 程继红. 基于层次 Petri 网工作流的航空装备维修流程建模[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(5): 138-141, 151.
ZHANG Guangyu, ZHANG Fuguang, CHENG Jihong. Aviation equipment maintenance process modeling based on hierarchical Petri net work-flow [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(5): 138-141, 151. (in Chinese)
- [4] 陈浩, 周正, 颀征. 基于状态维修的预防性维修策略优化模型研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 441-446.
CHEN Hao, ZHOU Zheng, XIE Zheng. Optimal preventive maintenance tactics model based on condition-based maintenance [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 441-446. (in Chinese)
- [5] 孙见忠, 易杨, 文洪, 等. 航空发动机全寿命维修概率建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 573-588.
SUN Jianzhong, YI Yang, WEN Hong, et al. Life cycle probabilistic modeling and simulation of aero-engine maintenance [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 573-588. (in Chinese)
- [6] BRIS R, CHATELET E, YALAOUI F. New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 82(3): 247-255.
- [7] BANJEVIC D, JARDINE A. Calculation of reliability function and remaining useful life for a Markov failure time process [J]. IMA Journal of Management Mathematics, 2006, 17(2): 115-130.
- [8] LU S, TU Y C, LU H. Predictive condition-based maintenance for continuously deteriorating systems [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(1): 71-81.
- [9] JAKUB A, KRAUS R, ANDREJ K, et al. Utilizing ontologies and structural conceptual models for safety data management in aviation maintenance, repair and overhaul organizations-ScienceDirect [J]. Transportation Research Procedia, 2018, 35: 35-43.
- [10] 周俊杰, 王德功, 李杰. 基于 PHM 的航空电子装备维修保障系统建模研究[J]. 航空科学技术, 2010(6): 17-19.
ZHOU Junjie, WANG Degong, LI Jie. Research on modeling of avionics equipment maintenance support system based on PHM [J]. Aeronautical Science & Technology, 2010(6): 17-19. (in Chinese)
- [11] 许飞. 民用航空发动机维修成本分析与控制研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
XU Fei. Research on maintenance cost analysis and control of civil aero-engine [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014. (in Chinese)
- [12] 曹惠玲, 吴泽民, 曲春刚, 等. 基于 CBM 策略的航空发动机在翼寿命预测研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1725-1730.
CAO Huiling, WU Zemin, QU Chungang, et al. Life on wing prediction of aeroengine based on CBM strategy [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13): 1725-1730. (in Chinese)
- [13] 于海田, 王华伟, 李强. 航空发动机健康综合评估研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(6): 996-1000, 1006.
YU Haitian, WANG Huawei, LI Qiang. A study of health evaluation for aviation engine [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(6): 996-1000, 1006. (in Chinese)
- [14] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 1-6.
- 作者简介:**
周 锐(1986—), 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 激光先进制造及装备开发, 光学检测, 技术管理等。
彭尚书(1999—), 男, 本科生。主要研究方向: 电气工程及其自动化, 继电保护, 优化算法。
李宇扬(2000—), 男, 本科生。主要研究方向: 测控技术与仪器, 嵌入式开发。
王晓东(1982—), 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 航空发动机售后服务保障体系建设与在役装备使用保障业务管理, 材料加工工程。
吴博傲(2000—), 男, 本科生。主要研究方向: 电气工程及其自动化, 超声波雷达。
刘喜宁(1979—), 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 航空发动机服务保障体系建设, 流体机械及工程。
雷泰然(2000—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机械设计制造及其自动化, 电磁超声应力检测。
- (编辑: 丛艳娟)