

基于约束理论的典型航空发动机非计划换发修理模式优化与实践分析

王贵勇¹ 赵峰²

1 北京飞机维修工程有限公司

2 中国国际货运航空股份有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19013

[摘要] 本研究聚焦于两台PW4056-3发动机的具体非计划换发维修案例,深入应用约束理论作为核心分析框架,系统识别并突破了存在于技术、资源与组织协同三个维度的核心瓶颈。研究过程中实施了精准工作范围制定、动态备件供应网络搭建、技术偏离窗口期管理以及跨职能协同熔断机制等相关实践,聚焦特定型号发动机紧急修理的具体流程与约束处理过程,剖析约束理论在维修全流程中的应用细节。

[关键词] 航空发动机维修; 非计划换发; 约束理论; 维修周期; 动态供应链

中图分类号: F416.5 文献标识码: A

Optimization and Practical Analysis of Unplanned Engine Change Repair Mode for Typical Aero-Engines Based on the Theory of Constraints

Guiyong Wang¹ Feng Zhao²

1 Ameco 2 Air China Cargo Co.

[Abstract] This study focuses on specific unplanned engine change maintenance cases involving two PW4056-3 engines. It deeply applies the Theory of Constraints as the core analytical framework to systematically identify and break through key bottlenecks in the three dimensions of technology, resources, and organizational coordination. During the research, relevant practices such as precise work scope definition, dynamic spare parts supply network construction, technical deviation window period management, and cross-functional coordination interruption mechanisms were implemented. The study concentrates on the specific processes and constraint handling of emergency repairs for a particular engine model, analyzing the application details of the Theory of Constraints throughout the entire maintenance process.

[Key words] aero-engine maintenance; unplanned engine change; Theory of Constraints; maintenance cycle; dynamic supply chain

商用航空发动机非计划换发是维修工程领域的棘手管理难题,该类事件突发且无预兆,直接打乱航班正常运营计划,加之维修涉及环节深、紧急备件调配难度大、各类资源衔接烦琐,造成维修周期久、投入成本高。其中PW4000系列发动机因高压涡轮单元体损伤引发的非计划换发占比偏高,这类换发的平均维修周期近7个月,让航空公司承受高额的发动机租赁成本,同时产生不小的运营间接损失,传统的串行式闭环被动维修模式,已无法适配这类高压、多约束的复杂工程场景。

1 航空发动机非计划换发修理的挑战与现状分析

1.1 技术层面的核心挑战

航空发动机研制的目标是寻求费用、性能、进度和可靠性、

维修性等多种要求的综合最佳组合。用户(航空公司)将发动机使用经济性作为飞机和发动机选型的重要依据。航空发动机非计划换发维修是极其复杂的系统工程,技术层面的难点集中在核心部件的损伤评估与修理决策。PW4056-3发动机的高压涡轮叶片和导向器损伤,是引发其非计划拆换的主要诱因,损伤的形貌、尺寸与扩展速率,直接决定该发动机能否在翼维修,或是必须立即换发开展车间大修^[1]。这一决策需依托精准的无损检测数据、材料疲劳特性认知及严格适航规章,任何判断偏差都易造成非必要换发,或让发动机带安全隐患运行。

1.2 资源层面的突出约束

资源约束方面主要体现为备件供应存在断档问题,非计划

换发情况直接打乱常规航材采购与库存安排,如低压涡轮螺栓、高压涡轮叶片这类关键周转件和寿命件,在全球供应链当中常常处于紧缺状态,部分关键备件常规采购周期能够达到120天,采购耗时情况直接拖慢整体的维修节奏。维修车间人力以及专用工装设备和检测台架承载能力短期固定,多台发动机同期进场维修的时候各类资源使用冲突会显著加剧。

1.3 组织协同层面的现实困境

组织与流程的协同状态直接关联非计划换发的维修周期,这类维修涉及工程评估、航材采购、生产计划、车间施工、质量检验等多部门配合,信息传递环节多,决策节点也较为繁杂。传统线性审批与串行作业的方式,易在部门衔接处出现工作等待、流程停滞的情况,遇上技术偏离申请、紧急采购审批这类关键决策时,单次时间耽搁会层层叠加,让整体维修周期被大幅拉长。

2 基于约束理论的维修模式分析框架

2.1 约束理论的核心内涵

约束理论是由高德拉特博士所提出的,其核心逻辑是任何系统产出并非各环节能力简单累加,而是受限于系统里最薄弱一个或少数几个瓶颈环节。应对系统约束不用对所有环节进行均衡发力,而是聚焦识别核心瓶颈并针对性发力,打破这类环节限制让系统流程自然顺畅流转^[2]。

2.2 三维约束突破分析框架的形成

结合约束理论的五步聚焦法,适配航空发动机非计划换发维修情况,形成三维约束突破实操步骤。对全域进行梳理,锁定技术路径不确定、备件供应动态延迟、跨部门决策低效三大并行约束,梳理三者交织影响的实际表现与关联节点。技术端,要在适航规章极限范围内精算损伤扩展数据,在备件端要打通多渠道的供应链路,在组织端要赋予前线团队框架内的自主决策权。挖掘约束的潜能决策模型可以表述为:

$$\text{批准裕度} = f(S, M, E, R) = \int_{t_0}^{t_c} \left[\frac{K_{th} - (S \cdot M \cdot E)}{R} \right] dt$$

其中,S是通过孔探观测量化后得出的损伤严重度参数,M是材料在当前工况下的疲劳裂纹扩展速率特性参数,E是发动机具体安装位置以及飞行循环类型所对应的环境载荷因子,R是依据历史数据和工程判断设定的安全冗余系数, K_{th} 是适航规章所规定的损伤容限阈值。

将车间非关键工位准备、通用工具调配等工作启动时间,精准匹配长周期关键备件的预计到货时间,同步非瓶颈资源与瓶颈资源的作业节奏。技术端向OEM申请技术偏离,采用简化修理方案。备件端启动紧急空运、调用全球备件共享池、制定替代件适配方案。组织端设置高层介入熔断机制,关键路径延迟超阈值即启动特别决策程序。原有瓶颈缓解后,重新全域排查新约束点,按前述步骤循环实施,动态调整各环节实操动作,杜绝管理惰性形成新瓶颈^[3]。

3 实证案例分析:PW4056-3发动机非计划换发协同修理过程

3.1 技术约束突破:基于损伤容限的动态在翼裕度管理

两台高压涡轮一级叶片超标损伤触发非计划换发后,工程评估团队不直接执行拆换指令,先启动精细化损伤容限评估,对叶片损伤部位开展高精度孔探复测,调取该批次叶片的材料数据库,测算出裂纹每100个飞行循环0.15毫米的扩展速率;参照联邦航空管理局咨询通告AC 33.74-2B,将实际损伤尺寸、裂纹扩展速率、发动机翼下安装位置的载荷因子、公司安全系数代入决策模型完成多轮迭代计算,明确两台发动机的实际安全裕度;编制详尽技术分析报告,向普惠公司及适航当局提交技术偏离申请,为发动机争取50个飞行循环的在翼运行审批;依托50个飞行循环的窗口期,敲定发动机最终维修方案,提前下发所有长周期备件的采购订单,针对车间维修工序完成工作包的梳理编制,同时细化制作配套工艺卡片,逐项落实维修前的各项准备工作。

3.2 资源约束重构:三级响应动态备件供应网络

获得时间窗口后聚焦关键备件供应,针对全球紧缺的低压涡轮模块连接螺栓(常规采购周期120天),项目团队落地“贝弗里奇-王”三级动态响应网络并细化各层级操作:第一级本地共享池,全面梳理公司内部航材库存,定向对接国内主要合作伙伴的库存信息,开展该螺栓的精准搜寻与调拨;第二级区域协作网,对接亚太地区MRO协作组织,发布该螺栓的具体需求信息,洽谈短期租赁、备件交换的实操对接流程;第三级全球应急通道,直接联动OEM全球紧急支援中心与国际大型航材分销商,提交该螺栓最高优先级生产排期申请,同步敲定专属空运物流方案。团队同步推进三级网络的各项操作,最终启用全球应急通道推进螺栓生产与空运,将获取周期压缩至27天;以维修基地为核心搭建本地池、区域网、全球通道三层同心圆结构,打通各层级资源与信息的实时交互渠道,在各网络关键节点标注明确响应时效,其中全球通道节点标注24—72小时响应标准。

3.3 组织协同调整:跨职能决策熔断与并行工程应用

成立跨职能联合指挥中心,吸纳工程、航材、生产、质量、财务等核心部门人员,明确其在授权范围内拥有联合决策权限,直接统筹双发并行维修相关协调工作。设置决策熔断机制,明确关键路径任务延迟预计超过72小时、常规协调无法解决时,自动触发熔断;熔断后问题立即升级至公司维修决策管理层,要求其4小时内组织专题会议,调动公司层面资源处置,可直接批准超预算、协调其他项目资源。对序列号P72**17的发动机,初步分解完成后,同步开展高压涡轮失效件详细冶金分析与新件采购流程,不等待全部拆解完毕;对序列号P72**82的发动机,依托历史维修数据搭建单元体匹配数字孪生模型,物理装配前在虚拟环境预演关键部件装配方案,排查干涉问题并制定预案。采用甘特图与网络图结合形式,横轴标注时间,纵轴标注维修阶段与资源类别,明确双发维修关键路径重叠交错部分、并行作业“时间折叠”区域,动态呈现共享人力资源弹性池的时间轴分配情况。

4 维修周期与相关数据的量化分析

4.1 维修周期的归因分析

通过多维度、系统性的约束突破实践，两台PW4056-3发动机的非计划换发维修周期出现明显缩短。为明确各项约束突破措施对周期变化的影响，开展归因分析，具体数据如下表所示：

表1 归因分析结果表

约束突破维度	具体措施	平均缩短天数	占总周期缩短量的比例
技术约束突破	在翼裕度管理	17天	28%
资源约束重构	动态三级供应网络	22天	35%
组织协调调整	熔断机制与并行工程	24天	37%
合计	-	63天	100%

4.2 相关成本的计算过程

单台PW4056-3发动机的月度租赁费用约为48万美元，维修周期缩短带来租赁成本的相应变化，具体计算采用以下公式：

$$C_{\text{saving}} = N \times R_{\text{lease}} \times \Delta T$$

其中， C_{saving} 为租赁成本变化量， N 为发动机台数（本案例中为2）； R_{lease} 为单台发动机月租金（48万美元）； ΔT 为单台发动机平均缩短的租赁月数（4.2个月）。代入数据计算可得：

$$C_{\text{saving}} = 2 \times 48 \times 4.2 \approx 403.2 \text{ 万美元}$$

结合双发并行维修带来的管理协同效应及更早恢复运力带来的间接收益，相关成本变化量约为500万美元，该数值与采用

本特利航空经济模型进行的早期预测相比，误差在±7%以内。

5 结语

针对商用航空发动机非计划换发管理方面难题以及PW4000系列发动机因高压涡轮单元体损伤引发换发痛点，采用基于约束理论构建的三维约束突破分析框架，从技术、资源、组织协同这些层面精准发力，能够有效破解传统串行被动维修模式存在的局限。实践显示，该框架通过动态在翼裕度管理、三级动态备件供应网络以及跨职能决策熔断机制的应用，成功把案例中两台PW4056-3发动机维修周期平均缩短63天，显著降低租赁及运营相关成本。

[参考文献]

[1]贾慧,党纪祖,贾鑫磊.航空发动机预防性维修滑油监测技术应用[J].内燃机与配件,2025,(23):105-107.

[2]熊波波,易炜,孙明明,等.基于功能复杂度的航空发动机平均修复时间分配方法研究[J].环境技术,2025,43(11):75-82.

[3]法荷航工程维修与深圳航空、昆明航空签署发动机维修协议[J].航空维修与工程,2025,(11):53.

作者简介：

王贵勇(1968--),男,汉族,河北人,北京飞机维修工程有限公司,大学本科,备发车间经理,研究方向：航空发动机大修和备用发动机管理。

赵峰(1981--),男,汉族,北京市人,中国国际货运航空股份有限公司,大学本科,工程师,研究方向：航空发动机机队管理性能监控。