

航空公司维修计划动态调整与生产准备适配机制

周平 陈晓彬

长龙（杭州）航空维修工程有限公司，浙江杭州，310000；

摘要：全球航空业高强度运行与竞争环境下，航空公司维修（MRO）效率成为效益关键，维修计划是MRO核心指令，受各方因素干扰表现出很强动态性。传统“计划—执行”模式使生产准备（航材、工具、人力、机位）难适配变化，造成资源错配与延误。本文分析了计划动态调整原因、冲击及传统模式不足。基于复杂适应系统理论和精益敏捷思想提出“动态调整—主动适配”机制。该机制以数字孪生搭建状态感知与预测平台，利用多目标动态调度模型改善维修计划并论述生产准备资源的柔性调配策略，通过形成闭环信息流和协同组织保障，达成计划调整与生产准备之间的即时精准匹配，仿真案例显示所提机制在提高维修效率、削减停场时间（TAT）以及提升资源利用率方面具有优势，为MRO系统数字化转型提供参考。

关键词：航空公司；维修计划；动态调整；生产准备；适配机制

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.066

引言

航空维修关乎飞行安全、航班正点率和运营成本，在飞机技术愈发复杂且机队规模增大时，MRO系统面临的难题越发突出，在实际操作过程中计划执行存在诸多不确定因素。一方面，飞机状态波动、突发故障（AOG）、非计划性维修（U/S）要求维修计划随时调整。另一方面外部扰动，航班变更、恶劣天气、供应链中断甚至全球公共卫生事件都会对原定计划造成冲击。因此维修计划的“动态调整”已成为MRO系统的常态。但是矛盾集中在计划的动态调整与生产准备相对滞后之间，而生产准备是维修实施的基础，传统模式依赖于固定的计划，当计划发生改变时，生产准备工作不能快速响应，“有机无料”“有料无人”的情况屡见不鲜，这种适配失灵极大地限制了维修效率，使得飞机在停场时间上（TAT）被拉长，并且还带来了额外的成本和安全风险。

现有研究大多围绕维修计划优化调度或者MRO供应链管理这两块单独展开，很少有人把“计划动态调整”和“生产动态准备”作为一个整体来进行研究，缺少对二者“适配机制”的探究。因此本文希望填补这个空白，从系统工程的角度出发研究二者的耦合关系。主要目的是构建一个能够主动感知扰动、智能调整计划并引导生产准备资源柔性适配的闭环体系，通过数字孪生技术、大数据分析以及敏捷管理手段实现从“被动应对”到“主动适应”的转变，在此基础上为提高MRO系统的韧性和效率探索出新的路径方案。

1 维修计划动态调整的动因与挑战

1.1 维修计划动态调整的内外动因

维修计划的动态调整是MRO系统对内外部不确定性的一种必然反应。内部动因首先是对飞机技术状态实时变化的监测，基于状态的维护（CBM）和健康与使用监控（HUMS）的要求，需要插入临时预防性维修任务。其次飞行运行波动（航班延误、取消等），会打乱原定的飞机进场时间。在维修执行中出现非预期发现（Unforeseen Findings），会导致工作包（Work Package）即时变更。

外部动因首先是监管机构的刚性要求，紧急适航指令（AD）要求在极短时间内完成某些检查或改装。其次供应链脆弱性问题突出，某类特定航材短缺、延迟交付等情况也会迫使计划调整。最后是市场环境变化导致主动调整维修计划，例如淡旺季转换时为了最大化运力会相应改变维修计划等。

1.2 动态调整对生产准备的冲击

维修计划的动态调整会在MRO生产准备系统中产生“牛鞭效应”。首先是航材保障方面，如果计划取消或推迟，会导致昂贵时控件提前到达占用资金；若紧急插入计划或增加维修深度，则会造成航材短缺，尤其是长周期订货（Long Lead-Time）部件，易造成维修中断。

其次是人力资源的冲击。计划变更直接影响工时需求，计划集中时易出现人手不足，尤其是具备稀缺资质的人员；计划取消则会造成工时浪费，频繁调整还容易打乱人员排班，引发疲劳与人为差错。

再来是工具设备和设施的冲击。不同的维修任务需要专用的设备、特定机库，计划动态调整容易造成这些关键资源的“堵”或者“闲”，比如非计划AOG事件可

能会长时间占用一个机位，产生“机位冲突”。

1.3 传统适配模式的局限性

传统生产准备适配模式面对这些冲击存在明显不足，其一在于信息传递延迟且孤立。计划调整消息在 MOC、PCC、工程、航材以及车间部门之间“逐层传送”，延时现象严重，且不同信息系统因结构差异导致数据标准不统一，使得生产准备部门响应迟缓。

二是资源配置刚性化。传统生产准备讲究“按部就班”，资源（人员、航材、工具）按照既定计划“固态”配置，航材采购依赖历史均值，人员编制固定且跨专业能力弱，机库分配缺乏动态性。

三是决策靠经验。计划一旦调整，如何调整生产准备策略？这很大程度上取决于个人经验，靠“拍脑袋”做决定，没有数据支撑，难以顾及全盘影响，往往陷入“按下葫芦浮起瓢”的被动救火状态。

2 动态适配机制的理论基础

要创建高效的动态适配机制，就得采用新的理论视角。笔者认为，复杂适应系统理论（CAS）、精益生产（Lean Production）与敏捷制造（Agile Manufacturing）理论以及数据驱动决策（Data-Driven Decision Making, DDDM）这三种理论是构建新机制的三大根基。

CAS 理论给 MRO 系统带来新的视角。MRO 系统是由众多相互作用的主体（飞机、人员、航材等）组成的复杂适应系统。该理论注重系统的“涌现性”和“适应性”，因此要设计合理的“规则”与“机制”，让其向高效适配方向“演化”。

精益生产、敏捷制造理论提供主要管理思想。精益生产强调消除浪费（Muda），例如适配失败引起的停场等待。而敏捷制造则要求系统面对不可预知变化时具备快速反应的能力——“柔性”，因此需要 MRO 系统具有很强的灵活性和可重构性。

DDDM 是实现精益、敏捷的技术支撑。通过大数据、人工智能等技术可以从大量的 MRO 数据中挖掘出规律来预测飞机的健康状况和维修资源需求，在计划调整时给出最优策略建议以取代传统的经验决策。

3 动态适配机制的构建

基于以上理论，本文提出一种包含“状态感知与预测”“动态调度优化”和“资源柔性配置”三大模块并以闭环信息流贯穿的动态适配机制。

3.1 机制的总体架构

该机制是一个自上而下、层层递进的闭环体系。最上面是顶层“动态调整层”MOC/PCC，用于识别计划调整需求；中间一层是最核心的“智能适配层”，即本文构建的新式适配机制，接收并分析调整请求，快速评估其影响，生成两份输出：“计划调整建议”和一个针对生产的“生产准备适配方案”。最下面一层是执行层面：航材、人力资源、工具等，按照此适配方案立刻重新进行安排调配。执行层数据实时回传到上面两层，并在不断地学习中持续地自我优化形成 PDCA 循环。

3.2 关键模块一：基于数字孪生的状态感知与预测

主动适配的前提是全面、实时的状态感知和精准预测。本文提出构建 MRO 系统的数字孪生（DigitalTwin）平台，该平台不仅要包含飞机的数字孪生体（健康状态、运行参数等），还要包含 MRO 生产环境的孪生体（机库、人员、工具、航材状态），通过物理与虚拟的实时映射，管理者可以“看见”MRO 系统当前瞬间的状态。更重要的是，基于高保真数据以及机器学习，能够提前预测出潜在故障及 RUL，将非计划维修转化为有计划维修，并且还能对计划调整后可能带来的生产准备资源冲击进行预判，为后续决策提供参考依据。

3.3 关键模块二：多目标动态调度模型

当识别到扰动或风险时，计划调整是必然的。本文提出了一个以“决策大脑”形式存在的多目标动态调度模型作为适配机制来实现平衡多个冲突的目标，最小化 TAT、最小化总成本、最大化资源利用率和机队可用度，其输入包括实时系统的状态（数字孪生、维修任务集和资源约束。在面对需要调整计划的时候，例如紧急插入 AOG 等情形下，通过智能优化算法如遗传算法、强化学习等快速求解出数个“帕累托最优”的调整方案供决策者选择，比如牺牲成本换取最短时间复飞的方案 A 和延长停场但资源占用相对平缓的方案 B 等选项使得决策者能够从“无计可施”变为“多中选优”。

3.4 关键模块三：生产准备资源柔性配置

适配机制的落脚点是生产准备资源“柔”。在人力资源方面，要推行“一专多能”的交叉培训、建立以能力模型为依据的人力资源池、使用智能排班系统自动匹配调度。在航材保障方面，构建差异化+敏捷化的供应体系：对关键部件数据共享虚拟库存；高频消耗件预测 JIT；同时搭建航材内部调剂和外部共享快速通道。工具设备与设施方面，运用物联网（IoT）技术实现重要

工具定位监控并形成共享资源池,并借助智能算法优化机库停机位一任务匹配。

4 动态适配机制的运行流程与保障

4.1 闭环信息流设计

三大模块的运作依靠高效协同的闭环信息流,扰动出现的时候,信息流促使“状态感知”模块去评判影响大小,如果影响很大就启动“动态调度”,最优调整方案(包括新计划和资源需求清单)被推送到“资源柔性配置”。各个子系统会自动或者半自动地重新安排,并把准备好的情况及时反馈给调度模块,MOC依据资源准备“绿灯”的信号来决定是否下达新的维修命令。执行过程中产生的任何新偏差都会被捕捉到,又开始新一轮“感知-调度-配置”的循环,这个信息流必须建立在一个统一的数据平台上才能实现,保证数据没有延迟也没有失真地流动。

4.2 组织协同与绩效考核

技术机制需要组织变革和绩效考核引导。传统MRO组织是“职能竖井”式,阻碍了动态适配,需要建立跨职能协同团队,比如围绕C检生产线的项目团队,并且给予更大的自主权。同时绩效考核(KPI)也必须从部门最优转向全局最优,不能只是考核航材部门库存周转率,而是引入如“计划调整的平均适配时间”“因生产准备不足导致维修延误工时”等新指标,引导各部门一起为目标服务。

5 仿真案例分析

为了检验“新机制”是否有效,我们建立了基于Agent的仿真模型来模拟某航司维修基地运行,并且对比了当面临同样的外部扰动(AOG任务、航班调整、航材延迟)时,“传统模式”和“新机制”的表现情况。

“传统模式”场景下,生产准备按计划固化、计划调整靠人工决策且信息滞后。“新机制”场景中部署模拟数字孪生、动态调度模型和柔性资源池(20%人力交叉技能、航材有快速通道)。

仿真周期90天,注入50次扰动。结果表明“传统模式”下35%的计划发生重大偏离,平均维修延误时间(MDT)增加28小时,人力资源缺口峰值达40%。“新机制”下系统具备强韧性数字孪生预警15%的扰动动态调度吸收70%的冲击柔性资源配置保证85%以上的紧急需求在4小时内得到满足最终“新机制”下平均维修延误时间仅6小时较传统模式缩短78.6%;飞机停场时间

(TAT)稳定性提升60%,资源利用率更加均衡。仿真实验验证了新机制面对不确定性的优势、提高维修效率和系统的韧性。

6 结论与展望

本文针对维修计划动态调整和生产准备适配失灵的矛盾,提出了一种新型的动态适配机制。该机制采用数字孪生感知、动态调度优化和资源柔性配置,并辅以信息流和组织保障实现计划与准备的即时匹配。本文贡献在于给出一套系统的、数据驱动的“适配”框架,指明从“被动救火”到“主动管理”的路径。

仿真验证了机制有效性,但研究有局限,比如机制实施需较高信息基础、数据治理和组织文化要求,并且经济成本与实施难度尚待考察,动态调度模型求解效率及资源柔性配置“度”等也需探讨。

展望未来,随着5G、IIoT和AI技术的成熟,MRO系统的“透明化”和“智能化”会不断提高。未来的重点研究可以是强化机器学习等自适应算法引入到调度模型中,让其具有“自我进化”的能力;同时加强对“人因工程”的研究,保证高效适配机制能够与维修人员实践紧密结合,最终实现航空维修“更安全、更高效、更经济”。

参考文献

- [1]全庆雷.航空器维修设备管理的问题分析与实践探索[J].中国设备工程,2025,587(19):8-11.
- [2]王储,彭远,王浩印,巴翔.基于AR+AI的智慧维修生态变革探索[J].航空维修与工程,2025,412(10):9-13.
- [3]王储,彭远,王浩印,巴翔.基于AR+AI的智慧维修生态变革探索[J].航空维修与工程,2025,412(10):9-13.
- [4]陈宏杰.关于航空维修系统危险源识别和风险方法[J].大众标准化,2025,451(19):104-106.
- [5]黄欣,石真,李明凤.民用航空发动机维修质量管理研究[J].内燃机与配件,2025,439(19):98-100.

作者简介:周平,男(1995-09),汉族,浙江杭州,本科,研究方向:生产准备的资源与合规筹备,以及生产线的智能调度、质量管控等维度;

陈晓彬,男(1990-01),汉族,四川,本科,研究方向:航空公司质量标准控制、安全风险识别与管控。