

基于关键链技术的飞机定检流程优化研究

杨宇杰 王锋宪

昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500

摘要: 飞机的定检工作是保障航空安全的核心环节, 虽然目前的定检工作已经相当成熟, 但其流程存在资源冲突、工期延误风险高、效率低等问题。本文以波音 737NG 系列飞机 C 检流程为研究对象, 引入关键链技术 (CCM) 优化定检流程。通过实地调研梳理现有 C 检流程, 识别关键工序与资源约束, 结合三点估算法确定关键链, 设计项目缓冲与输入缓冲机制, 并通过 FlexSim 仿真验证优化效果。结果表明, 优化后 C 检总工期缩短 12.3%, 资源利用率提升 9.8%, 工期达标率从 72% 提高至 95%, 有效解决了传统定检流程的瓶颈问题, 为航空维修企业提供实践参考。

关键词: 关键链技术; 流程优化; FlexSim 仿真; 资源约束

0 引言

航空安全是民航业发展的核心, 而飞机定检作为周期性维修活动, 直接决定航空器的适航状态与运营效率。近几年国内民航运输飞机 C 检 (2000-3000 飞行小时/次) 因工序复杂 (涵盖 1200 余项任务)、资源需求集中 (如无损检测设备、发动机维修工位), 延误问题尤为突出^[1]。传统定检流程采用关键路径法 (CPM) 制定计划, 仅关注工序逻辑依赖, 忽视资源约束与工期估算冗余, 导致“学生综合征”“帕金森定律”频发, 造成人力、设备资源浪费的同时, 增加航班调度压力。目前, 飞机定检原位工作基本上是按照时间段由各专业依次进行, 导致专业之间以及专业内部工作的衔接不够紧凑, 定检效率低下^[2]。未来将在满足工序和人员条件约束的前提下, 打乱各专业按照定检时间段进行原位工作的保障模式, 将原位工作分为工作准备和工作实施两个阶段, 上一项工作的实施和下一项工作的准备并行进行, 在此基础上对定检原位工作流程进行组合优化设计^[3]。

关键链技术 (Critical Chain Method, CCM) 由 Goldratt 于 1997 年提出, 核心是在考虑资源约束的基础上识别关键链, 通过设置缓冲机制吸收工期波动, 已在制造业、建筑工程等领域验证了流程优化效果^[4]。将其应用于飞机定检流程, 可精准定位瓶颈工序、平衡资源配置、降低延误风险, 对提升航空维修企业运营效率、保障航班准点率具有重要实践意义。Jiao 等 (2018)^[5] 以波音 737NG 飞机 C 检为对象, 采用关键链技术优化发动机拆装流程, 使工期缩短 15%; 欧盟 “Clean Sky 2” 项目将关键链与数字化维修结合, 实现定检资源动态调度。王健 (2020)^[6] 针对波音 737NG 飞机 A 检流程, 通过关键链识别减少资源冲突, 但未涉及缓冲机制设计; 张光宇等 (2020)^[7] 给出基于层次 Petri 网的工作流网定义, 却未结合关键链思想对工期—资源进行协同优化与量化缓冲设计。现有研究存在“单一机型聚焦多、资源—工期协同优化少”的问题, 需进一步结合实际

定检场景完善关键链应用体系。

本文以某航空维修企业波音 737NG 飞机 C 检流程为研究对象, 梳理现有 C 检流程, 并诊断出 C 检流程存在的瓶颈问题; 再基于关键链技术设计优化方案, 进行关键链的识别、设置缓冲区以及对资源进行调配等; 最后通过 FlexSim 仿真验证 C 检流程优化后的效果。

1 相关概念与理论基础

1.1 飞机定检流程核心概念

飞机定检按维修深度分为 A 检 (轻度, 400-600 飞行小时)、C 检 (中度, 2000-3000 飞行小时), 其中 C 检涵盖机身结构检查、航电系统测试、发动机性能检测等核心工序, 具有“工序依赖强、资源需求多、周期长 (传统计划 14 天)”的特点。典型 C 检流程分为 4 个阶段: 拆检、检测、维修、组装测试, 各阶段存在严格的逻辑依赖与资源竞争。

1.2 关键链技术理论体系

关键链项目管理 (CCPM) 是一种项目进度管理技术, 主要基于约束理论 (TOC), 并且吸收了关键路径法 (CPM)、计划评审技术 (PERT) 等传统计划管理方法的经验。约束理论 (Theory of Constraints) 又叫制约理论。它是由以色列物理学家 Goldratt 博士^[8]提出的一套管理方法, 主要应用于生产企业。约束理论是在最优生产技术 (Optimised Production Technology, OPT) 的基础上发展而成的。约束理论的思想核心在于从整个系统的角度出发进行考量, 摒弃了仅仅着重于局部的思维方式。约束理论将企业内的资源分为两类, 一种是瓶颈资源或者叫关键资源, 另一种称为非瓶颈资源/非关键资源。约束理论认为, 要缩短生产周期, 就要提高瓶颈资源的利用率。它要求企业管理者将有限的精力集中在瓶颈资源和工序上。因为在企业运作中, 生产进度只受瓶颈资源和工序的影响。这些资源的利用率越高, 则越有把握按时完成生产任务。关键链技术以资源约束决定项目周期为核心, 区别于传统

CPM/PERT 仅关注工序逻辑的局限, 关键链技术是指在项目中对工序逻辑依赖和资源约束双重限制下的最长路径, 是决定总工期的核心^[9]。关键链技术采用三点估算法计算工序工期。在工程项目正式开工之前, 如果对工序的活动时间估计过长, 加入过多的安全时间, 会造成在工序开始阶段人员的怠惰心理, 导致进度拖沓, 因为人们心理上总是容易出现向后拖延的倾向。而采用三点估算法来估计工序活动时间, 目标时间相对没有那么宽裕, 工作人员一开始就必须集中精力投入工作, 并保持高效。这样有助于消除人员的懈怠思想, 防止任务超期。关键链技术在项目计划路径的末端设置缓冲区, 以吸收不确定因素带来的影响, 进而降低风险。缓冲区包括项目缓冲 (Project Buffer, PB), 设置在关键链末端, 吸收关键链工期波动; 输入缓冲 (Feeding Buffer, FB), 设置在非关键链汇入关键链的节点, 避免非关键链延误影响关键链^[10]。同时, 平衡资源冲突, 优先保障关键链工序的资源需求, 非关键链工序可灵活调整开工时间, 避免资源冲突。

1.3 流程优化与仿真工具

流程优化是通过建模工具可视化工序关系, 本文采用流程图梳理现有 C 检流程, 明确各工序的输入、输出与依赖关系。仿真验证采用 FlexSim 软件, 其优势在于: (1) 支持离散事件建模, 可模拟人员、设备的动态调度; (2) 内置资源库丰富, 可直接调用维修工人、检测设备实体; (3) 可输出工期分布、资源利用率等量化指标, 为优化效果验证提供数据支撑。

2 基于关键链技术的飞机 C 检流程

当前飞机 C 检任务繁杂、周期长且资源依赖度高, 常规流程采用节点式计划, 易出现资源冲突、安全时间滥用导致整体周期拉长, 及多任务并行时局部延误传导至全局的问题。而引入关键链技术后, 可通过识别 C 检瓶颈工序识别、整合人财物资源避免闲置与冲突, 并设置项目缓冲与输入缓冲吸收不确定性, 有效解决上述问题。关键链技术能匹配飞机 C 检项目的多专业协同需求, 既优化资源利用率, 又可缩短检修周期, 同时降低延误风险。基于此, 建立基于关键链技术的飞机 C 检流程, 主要包括关键链识别和缓冲区设置。

2.1 关键链识别

关键链识别阶段主要包括: 建立初始网络计划图、估算修理任务的具体工期和平衡资源冲突等。

2.1.1 建立初始网络计划图

根据飞机维修工卡, 开展飞机 C 检流程的工作结构分解, 确定维修项目。维修项目之间的逻辑关系受技术、组织关系、外部制约等因素影响。对于飞机定检维修, 各个维修项目之

间的逻辑关系可根据维修工卡、定检项目节点计划以及 C 检工作包来列表并作图说明。

2.1.2 估算定检任务工期

在航空维修领域, 传统的做法往往是维修单位根据历史经验和预留安全余量来给定每个维修任务的工期。这种方法虽然简单, 但通常会导致工期估计过于保守, 造成资源闲置和时间浪费。为提高工期估算的科学性与准确性, 本研究摒弃传统经验法, 采用项目管理中的三点估算法来确定飞机 C 检流程中各任务的工期。三点估算法通过综合考量任务执行中的不确定性, 计算出更具现实意义的期望工期。其计算公式为: $T_e = (T_o + 4T_m + T_p) / 6$

其中, T_o 为乐观工期, T_m 为最可能工期, T_p 为悲观工期, T_e 为期望时间。

2.1.3 平衡资源冲突

飞机 C 检涉及机械、航电、结构等多专业工序, 常因共享资源的并行需求产生冲突, 延误关键链工序。平衡资源冲突的过程以关键链为核心, 先精准识别冲突点及影响范围, 再通过工序优先级排序、时序调整与资源柔性调配, 在保障关键工序进度的同时, 减少资源闲置与浪费, 最终实现资源与工序的高效匹配。

在识别资源冲突方面, 第一步梳理核心资源清单, 明确设备、人员、场地三类资源, 明确各工序资源需求的时段、时长及规格; 第二步将资源需求与初始排期对齐, 标记重叠需求; 第三步评估冲突影响, 判断冲突是否涉及发动机拆解等关键链工序, 明确潜在延误风险。

在平衡资源冲突方面, 先按“关键链工序 > 关键链紧前工序 > 非关键工序”划定优先级, 优先保障关键链工序的顺利实施; 再对非关键工序时序错峰, 调整存在资源冲突的工序; 时序调整有缺口时, 调用备用资源或跨班组整合双资质人员; 最后验证调整效果, 确保关键链无冲突、非关键工序延误不超缓冲, 资源利用率达 85% 以上。

2.2 缓冲区设置

缓冲区设置是关键链项目管理研究的核心问题。在解决资源冲突以及处理不确定性的基础上确定缓冲区已成为近年来关键链技术研究的热点, 但尚未形成缓冲区设置方法体系。针对飞机 C 检流程这种传统而又复杂的领域, 本文运用基于保守工期的 50% 法则与基于不确定性评估的三点估算法偏差来计算缓冲区的大小。

针对项目缓冲的计算, 采用 50% 法则计算, 其公式为: 项目缓冲大小 = $\max(\text{关键链总工期} \times 50\%, \text{非关键链最大工期} - \text{关键链总工期})$ ^[8]。

输入缓冲则用于吸收非关键链汇入关键链时带来的波动, 其大小由该非关键链工期的标准差决定, 计算公式为 $FB = 3\sigma$, 其中标准差 σ 由该链上各工序悲观工期与乐观工期之差除以 6 估算得出, 即 $\sigma = (T_p - T_o) / 6$ 。

3 应用分析

3.1 工程背景

本文选取国内某航空维修企业（以下简称“某公司”）的波音 737NG 飞机 C 检流程为研究对象。该公司 C 检车间配置 2 个固定工位、1 台无损检测设备（UT/MT 一体机）、3 个维修班组，每组 6 人，分别负责机身、航电、发动机，2023 年 1-6 月共完成 12 架次 B737 C 检，平均计划工期 14 天，实际平均工期 16.2 天，延误率达 85%，主要延误工序集中在发动机拆检、航电系统测试等工序。为了解决上述工期延误的问题，本文以波音 737NG 飞机 C 检流程为

例采用关键链技术进行应用分析。

3.2 初始网络计划

波音 737NG 飞机 C 检流程按照工作结构分解，得到 9 个维修项目，如表 1 所示。根据历史数据，运用传统工期估算方法计算出飞机 C 检流程各工序的初始工期，并利用三点估算法计算各工序完工工期、所需资源以及各工序之间的前后逻辑关系。按照波音 737NG 飞机 C 检流程的各工序初始工期和各工序逻辑关系，形成初始网络计划图，如图 1 所示，此时项目的关键任务工序链为：1-3-5-7-8-9，总工期为 14 天。

表 1 现有 B737NG C 检关键工序及参数（2023 年 1-6 月均值）

工序编号	工序名称	逻辑依赖工序	所需资源	初始工期	乐观工期(天)	最可能工期(天)	悲观工期(天)	期望工期(天)
1	机身蒙皮拆除	-	维修班组 1	2.5	1.0	1.5	2.0	1.5
2	座椅拆除	-	维修班组 1	1.0	0.5	1.0	1.5	1.0
3	发动机外罩拆除	1	维修班组 3	2	0.8	1.2	1.6	1.2
4	机身结构无损检测	2	维修班组 2+无损设备	1.8	1.2	1.8	2.4	1.8
5	发动机性能检测	3	维修班组 3+无损设备	2.5	1.5	2.0	2.5	2.0
6	航电系统测试	4	维修班组 2	2	0.9	1.7	2.5	1.7
7	故障部件更换	5、6	维修班组 1	2.5	1.0	1.5	2.0	1.5
8	发动机调试	7	维修班组 1/2/3	2	0.8	1.2	1.6	1.2
9	整机通电测试	8	维修班组 3	2.5	1.0	1.5	2.0	1.5

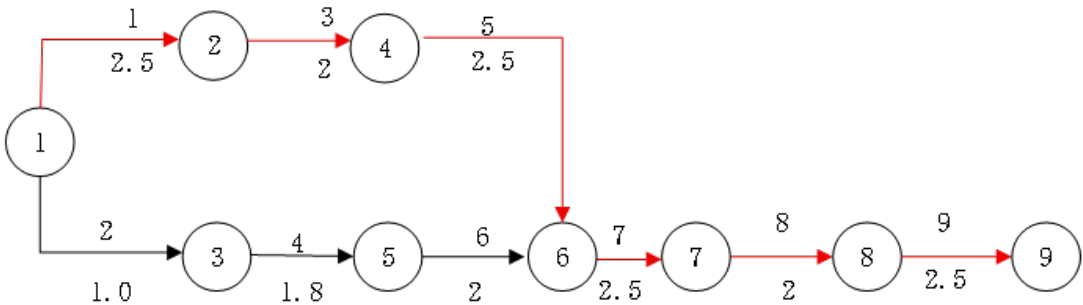


图 1 初始网络计划图

3.3 基于关键链技术的优化分析

基于表 1 数据，采用三点估算法计算各工序期望工期（ T_e ），结果如下：工序 1（1.5 天）、工序 2（1.0 天）、工序 3（1.2 天）、工序 4（1.8

天）、工序 5（2.0 天）、工序 6（1.7 天）、工序 7（1.5 天）、工序 8（1.2 天）、工序 9（1.5 天）。并识别了关键资源瓶颈无损检测设备（仅 1 台）、维修班组 2（同时负责工序 4、6）。通过绘制资源负荷图发现，无损检测设备在第 2-4

天(工序4)与第3-5天(工序5)存在冲突,维修班组2在第2-4天(工序4)与第5-7天(工序6)存在负荷高峰。在考虑资源约束的情况下,对项目进度计划网络进行资源、维修工艺和人员配置优化设计,通过“工序逻辑路径+资源

占用路径”叠加分析,确定最长路径为:工序1→工序3→工序5→工序7→工序8→工序9,总期望工期 $1.5+1.2+2.0+1.5+1.2+1.5=8.9$ 天。形成的项目进度计划网络图如图2所示。

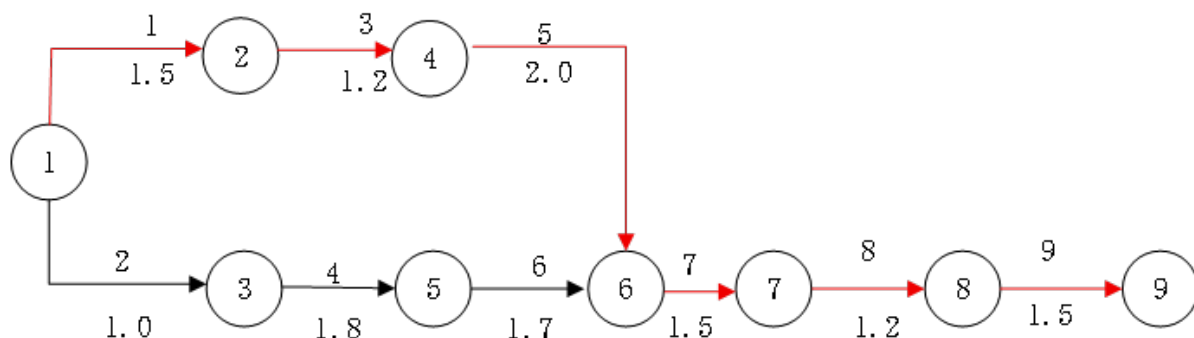


图2 基于资源利用约束的优化网络计划图

根据上述项目网络图,运用上述缓冲区的设置方法,计算得出项目缓冲(PB):关键链总工期8.9天,非关键链最大工期(工序2→工序4→工序6)为 $1.0+1.8+1.7=4.5$ 天,非关键链工期小于关键链总工期,故 $PB=关键链总工期 \times 0.5=8.9 \times 0.5=4.45$ 天,取整4.5天;输入缓冲(FB):非关键链汇入关键链的节点为“工序6→工序7”,计算每个工序的标准差(σ):

$\sigma_2=0.167$ 天, $\sigma_4=0.2$, $\sigma_6 \approx 0.267$ 天,计算整条非关键链路径的总标准差(σ 链), σ 链 $=\sqrt{(\sigma_2^2+\sigma_4^2+\sigma_6^2)} \approx 0.373$ 天; $FB=2 \times \sigma$ 链 $=2 \times 0.373$ 天 ≈ 0.75 天,取整0.8天。

综上,可得到基于关键链技术的波音737NG飞机C检流程进度计划网络,如图3所示。

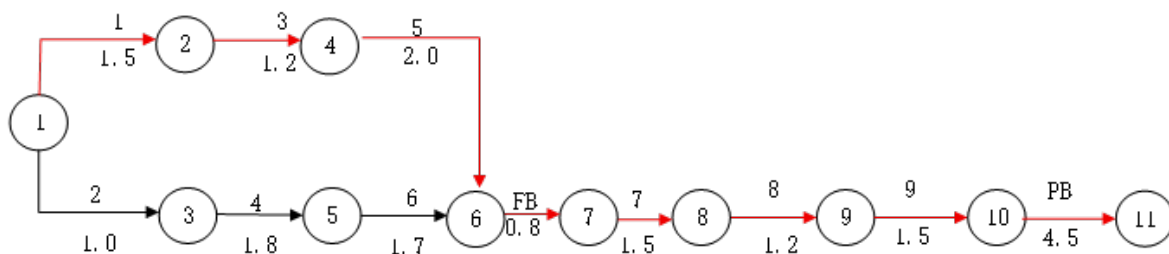


图3 基于关键链技术优化后的网络计划图

优化后C检流程关键链仍为“工序1→工序3→工序5→工序7→工序8→工序9”,在充分考虑资源约束并采用期望工期进行排程后,关键链总期望工期为8.9天。为应对项目执行中的不确定性,为此关键链设置了4.5天的项目缓冲(PB)。因此,项目总计划工期设定为13.4天,相较于传统计划的14天更为紧凑与可靠。同时,在非关键链“工序2→工序4→工序6”汇入关键链处设置了0.8天的输入缓冲(FB),以吸收其工期波动,避免其对关键链造成冲击。优化后流程资源冲突率从32%降至8%,工序衔接等待时间从1.2天/架次缩短至0.5天/架次。

4 优化方案验证与效果分析

4.1 FlexSim 仿真模型构建

(一) 实体设置:在FlexSim中创建实体飞机(生成器,每14天生1个)、C检工位(处理器,2个)、维修班组1/2/3(操作员,各6人)、无损检测设备(处理器,1台)、缓冲区域(暂存区,用于放置拆检部件)。

(二) 参数输入:基于优化前后工序工期、资源配置数据,设置实体参数,如工序4优化前工期1.8天,优化后1.6天;维修班组2优化后人数临时增加2人;仿真周期设为120天,重复运行5次取平均值,避免随机误差。

(三) 评价指标:选取3项核心指标,总

工期（单架次 C 检从开工到竣工的时间）、资源利用率（无损检测设备与维修班组的实际工作时间 / 总可用时间）、工期达标率（实际工期 \leq 计划工期的架次比例）。

4.2 仿真结果分析

（一）工期优化效果：优化后单架次平均实际工期从 16.2 天降至 14.2 天，缩短 12.3%。关键链技术制定了更进取的新计划工期 13.4 天（原计划 14 天）。若均以新计划 13.4 天为达标基准进行衡量，仿真及预测结果表明，工期达标率可从优化前的不足 30% 大幅提升至 95% 左右。这雄辩地证明了新计划既更紧凑，又更可靠。项目缓冲有效吸收了工序波动，例如一次 0.8 天的延误被完全弥补。

（二）资源利用率提升：无损检测设备利用率从优化前的 68% 提升至 76.8%；维修班组 2 利用率从 72% 提升至 80.5%，整体资源浪费减少约 9.8%。

（三）场景适应性验证：实际模拟了“无损检测设备故障 1 天”的极端场景，优化前工期延误 2.3 天，优化后仅延误 0.9 天，说明优化方案具有较强的抗干扰能力。

4.3 实际应用效益预测

基于某航空公司 2023 年运营数据，C 检单价 80 万元 / 架次，人工成本 500 元 / 人 / 天，设备折旧 2 万元 / 天，优化方案落地后可实现。

经济效益：工期节省 2 天，操作人员 18 人，按照 500 元 / 人 / 天进行计算，人工成本减少 1.8 万元，设备折旧按 2 万元 / 天计，2 天减少折旧 4 万元，但设备实际占用提前了 0.5 天，故设备折旧减少 1 万元，单架次 C 检成本从 28 万元降至 25.2 万元。

5 结论

本文针对目前飞机定检流程存在资源冲突、工期延误风险高、效率低等问题，将关键链技术应用于飞机定检流程中，开展了飞机定检流程管控的研究，得到以下结论：

（一）结合飞机定检流程特点与关键链技术优势，构建基于关键链技术的飞机 C 检流程，识别关键工序与资源约束，结合三点估算法确定关键链，设计项目缓冲与输入缓冲机制来确定飞机 C 检流程的制定、实施和监控中面临的不确定问题和风险因素带来的影响，可以提高飞机 C 检计划的稳定性。

（二）将基于关键链技术的飞机 C 检流程应用于波音 737NG 飞机 C 检流程的实际作业，经对该流程的应用分析，优化后 C 检总工期缩短 12.3%，资源利用率提升 9.8%，工期达标率从 72% 提高至 95%，有效解决了传统定检流程的瓶颈问题。

参考文献：

- [1]Deng, Q., Santos, B. F., Verhagen, W. J. C. A Novel Decision Support System for Optimizing Aircraft Maintenance Check Schedule and Task Allocation[J]. Decision Support Systems,2021, 146: 113545.
- [2] 马登武, 张勇亮, 姚成柱, 等. 基于蚁群算法的飞机定检原位工作流程优化 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 147-151.
- [3] 吕晓峰, 谢勇, 席建峰, 等. 基于遗传退火算法的飞机定检原位工作流程优化 [J]. 计算机与现代化, 2012(7): 25-29.
- [4]Atici K B, Podinovski V V. Using data envelopment analysis for the assessment of technical efficiency of units with different specialisations: An application to agriculture[J]. Omega, 2015, 54: 72-83.
- [5]Jiao Y, Sun H, Wang C, et al. Research on Unstable Approach Detection of Civil Aviation Aircraft[J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 525-530.
- [6] 王健. 可靠性在民用飞机维修工程中的应用研究 [J]. 中国航班, 2020(20): 234-240.
- [7] 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(05): 138-141+151.
- [8]Goldratt E M. Critical chain[M]. Great Barrington: The North River Press, 1997.
- [9]Rodriguez A, Ortega F, Concepci ó n R. A method for the evaluation of risk in IT projects[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 45: 273-285.
- [10]Chuxue W. Ucnctic Algorithm for hybrid flow shop scheduling[J]. Computer Products and Circulation, 2019(3) :88-90.

作者简介：杨宇杰（1988—），男，汉，云南曲靖人，本科、在职硕士研究生，研究方向：飞机维修。