

不停航施工工况下机场旅客捷运系统联调进度管理资源 - 窗口协同优化研究

毛韦润

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2026年8月20日; 录用日期: 2026年9月12日; 发布日期: 2026年9月22日

摘 要

为解决不停航施工条件下机场旅客捷运系统联调阶段资源冲突、夜间窗口受限与整改复测闭环导致的进度等待问题, 本文基于某枢纽机场旅客捷运系统工程脱敏XER计划数据, 归并形成14个核心工序和17条FS/SS关系, 构建考虑资源容量、窗口约束和闭环复测的赋时Petri网模型, 并设置S0优化前场景与S1优化情景进行对比。结果显示, 在不改变核心逻辑和必要前置条件下, 系统级联调至整改闭环周期由216 d缩短至168 d, 关键控制链的日历跨度由821 d缩短至592 d, 资源等待时间由155 d降至36 d, 整改复测闭环周期由92 d降至64 d。研究表明, 赋时Petri网可刻画联调过程中的多前置同步、资源 - 窗口耦合等待及闭环传递机制; 在设定的优化情景下, 关键链优先、资源错峰和连续窗口保障能够改善模型中的联调等待和进度表现。本文可为不停航施工条件下机场复杂系统联调阶段的进度管理、资源管理和优化决策提供方法支撑, 并为大型枢纽工程复杂系统集成阶段的计划优化提供参考。

关键词

进度管理, 不停航施工, 机场工程, 旅客捷运系统, 赋时Petri网

Resource-Window Collaborative Optimization for Commissioning Schedule Management of Airport Automated People Mover Systems under Non-Shutdown Construction Conditions

Weirun Mao

School of Economics & Management, Tongji University, Shanghai

Received: August 20, 2026; accepted: September 12, 2026; published: September 22, 2026

文章引用: 毛韦润. 不停航施工工况下机场旅客捷运系统联调进度管理资源-窗口协同优化研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(5): 1050-1059. DOI: 10.12677/mse.2026.155102

Abstract

To address schedule waiting problems caused by resource conflicts, restricted night-time work windows, and rectification-retesting loops during the commissioning stage of an airport automated people mover system under non-shutdown construction conditions, this study uses desensitized XER schedule data from an automated people mover project at a hub airport. Fourteen core activities and 17 FS/SS relationships are consolidated, and a timed Petri net model considering resource capacity, work-window constraints, and rectification-retesting closure is developed. An S0 pre-optimization scenario and an S1 optimization scenario are then established for comparison. The results show that, without changing the core engineering logic or necessary precedence conditions, the system-level commissioning-to-rectification closure period is shortened from 216 d to 168 d, the calendar span of the key control chain is reduced from 821 d to 592 d, resource waiting time decreases from 155 d to 36 d, and the rectification-retesting closure period is reduced from 92 d to 64 d. The study indicates that the timed Petri net can represent multi-predecessor synchronization, resource-window coupled waiting, and closure-loop transmission mechanisms in the commissioning process. Under the defined optimization scenario, key-chain priority, resource staggering, and continuous window assurance can improve commissioning waiting and schedule performance in the model. This study provides methodological support for schedule management, resource management, and optimization decision-making during airport complex-system commissioning under non-shutdown construction conditions, and offers a reference for schedule optimization in the system integration stage of large hub infrastructure projects.

Keywords

Schedule Management, Non-Shutdown Construction, Airport Engineering, Automated People Mover System, Timed Petri Net

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大型枢纽机场改扩建日益需要在持续运行条件下实施。不停航施工必须满足运行安全、区域隔离、准入审批、清场恢复和有限作业窗口等要求[1]-[3]。本文研究对象为某枢纽机场旅客捷运系统(Automated People Mover, APM)工程。该系统嵌入航站区及空侧运行环境,其联调阶段连接设备安装、系统功能验证和运营接管,需要同步满足车辆、信号、供电、站台门、车站设备及运营控制等专业接口,并完成故障测试、验收整改、安全审批和夜间窗口组织。因此,联调进度具有多专业接口耦合、关键资源竞争、作业窗口受限和整改复测闭环等特征[4]-[8]。

已有研究为上述问题提供了多方面基础。不停航施工研究主要关注施工组织、安全管控和运行保障,揭示了机场持续运行条件下审批、隔离和有效作业时间的约束作用[1]-[3] [9]; APM 研究侧重建设管理、系统集成、接口测试和运行维护,说明联调是多系统功能与接口状态的共同验证过程[4]-[8]。在进度管理领域,CPM、PERT、关键链、资源受限项目调度和时间窗调度能够处理工序逻辑、关键资源及可执行时段[10]-[13]; Petri 网及其时间、资源约束扩展则能够表达并发、同步、冲突、持续时间和资源使能,并已于项目进度和机场作业过程建模[14]-[22]。

然而，既有研究尚未充分解释不停航约束如何在机场 APM 联调阶段转化为具体资源与窗口条件，以及工序为何等待、等待如何经多前置同步和整改复测闭环向后传递。传统进度方法擅长逻辑排程和资源优化，但对状态满足与等待传递的表达不够直观。赋时 Petri 网可用库所表示工序、资源和窗口状态，以变迁表示工序触发，以 Token 表示容量与可用性，并通过变迁时延描述持续时间，从而统一表达前置逻辑、资源占用释放、窗口等待和闭环状态转移[14]-[18]。

基于此，本文基于某枢纽机场旅客捷运系统工程项目，利用其脱敏 XER 进度计划数据，从 2645 条原始作业中识别 359 条捷运系统范围作业和 66 条联调相关初筛作业，进一步归并形成 14 个核心联调工序，并结合 XER 计划日期、WBS 层级和工程逻辑推导 17 条 FS/SS 逻辑关系。随后构建考虑资源容量、作业窗口和整改复测闭环的赋时 Petri 网模型，设置 S0 优化前场景与 S1 优化情景，比较不同资源组织、窗口组织和闭环组织条件下的模型运行结果。研究旨在为不停航施工条件下机场复杂系统联调计划编制、关键约束识别和进度优化决策提供方法参考。

2. 研究方法 with 数据处理

本文按照“XER 数据处理 - 核心工序与逻辑关系构建 - 赋时 Petri 网建模 - S0/S1 情景模拟”的研究思路开展研究，如图 1 所示。

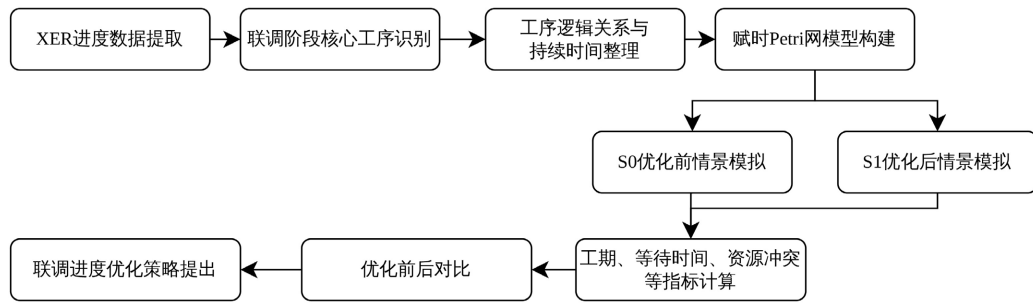


Figure 1. Research roadmap
图 1. 研究思路路线图

2.1. XER 数据提取与联调作业初筛

本文数据来源为某枢纽机场旅客捷运系统工程脱敏 XER 进度计划数据。从 2645 条原始作业中，依据 WBS 路径、专业归属、作业名称和计划日期识别 359 条捷运系统范围作业，并筛选形成 66 条联调相关作业。由于直接挂接在联调 WBS 下的作业较少，筛选范围适度前移至形成车辆交付、送电、分系统调试和验收条件的作业；初筛作业尚不直接等同于 Petri 网变迁。上述数据处理与建模数据集构建结果见表 1。

Table 1. Data processing and modeling dataset construction results
表 1. XER 数据处理与建模数据集构建结果

处理环节	数据规模/结果	处理依据	后续用途
原始 XER 作业提取	2645 条作业	XER 作业、WBS、日期、工期	计划数据基础
捷运系统范围识别	359 条作业	WBS 路径、专业系统、作业名称	确定研究边界
联调相关作业初筛	66 条作业	WBS、关键词、专业系统、计划日期	形成候选作业集合
核心联调工序归并	14 个核心工序	XER 日期归并、工序功能、专业系统	作为 Petri 网变迁
核心逻辑关系构建	17 条关系	XER 日期、WBS 层级、工程逻辑	形成 FS/SS 逻辑关系映射

续表

资源约束识别	9 类资源约束	工序功能、联调组织逻辑	构建资源库所
不停航窗口约束识别	6 类窗口约束	夜间作业特征、窗口组织逻辑	构建窗口库所
情景模拟设置	S0 优化前场景、S1 优化情景	基准参数与脱敏模拟假设	用于情景对比

注：核心逻辑关系并非从 XER 完整显式 TASKPRED 关系直接提取，而是结合 XER 计划日期、WBS 层级和联调工程逻辑推导形成；资源容量、窗口参数及 S1 优化情景为脱敏/模拟假设，仅用于情景模拟。

2.2. 核心工序归并与建模数据集构建

为控制模型规模，本文按照专业、阶段、功能和控制作用将 66 条初筛作业归并为 14 个核心工序，并结合日期、WBS 层级和工程逻辑推导 17 条 FS/SS 逻辑关系。工期参数主要由 XER 计划日期归并形成，归并属于数据清洗与模型抽象，不改变主要进度控制逻辑。

2.3. 资源约束与不停航窗口约束识别

基于核心工序功能和联调组织逻辑，本文识别 9 类关键资源与 6 类不停航窗口约束，并在模型中分别映射为资源库所和窗口库所。Token 数量表示相应容量；资源或窗口 Token 不足时，工序进入等待。

2.4. 数据来源、推导关系与参数边界说明

模型输入分为 XER 原始数据、XER 日期归并、工程逻辑推导和脱敏/模拟假设四类。XER 提供作业、WBS、日期与工期基础；核心 FS/SS 逻辑关系由日期、层级和工程逻辑推导；资源容量、窗口条件及 S1 参数用于比较组织策略相对效果，不代表实际配置或最终工期预测。

3. 赋时 Petri 网模型构建

3.1. 模型边界

模型覆盖某枢纽机场旅客捷运系统工程的分系统调试、车辆动静调、综合联调、验收及整改复测，将 14 个核心工序映射为变迁；其他作业仅作为前置、资源或窗口条件。核心工序映射见表 2。

Table 2. Core commissioning activities and Petri net element mapping
表 2. 核心联调工序及 Petri 网元素映射表

核心工序	工序名称	工序类型	对应变迁	主要约束
C01	首列车交付条件确认	前置里程碑	T_{C01}	R1
C02	轨道系统安装及调试完成	分系统调试	T_{C02}	R2
C03	供电系统送电条件确认	前置条件	T_{C03}	R3, W2
C04	信号系统安装及调试完成	分系统调试	T_{C04}	R4, W4
C05	站台区设备系统安装及调试完成	分系统调试	T_{C05}	R5, W3
C06	捷运车站专业设备及系统调试完成	分系统调试	T_{C06}	R6
C07	维修基地专业设备及系统调试完成	分系统调试	T_{C07}	R7
C08	中心仓库专业设备及系统调试完成	保障系统	T_{C08}	—
C09	车辆静态调试与动态调试	车辆调试	T_{C09}	R1, R3, R4, R7; W1, W4
C10	其余列车交付及安装调试	车辆调试	T_{C10}	R1, R7; W1
C11	旅客捷运系统综合联调	系统级联调	T_{C11}	R1, R3, R4, R8; W1, W2, W4, W5

续表

C12	旅客捷运系统初验完成	阶段验收	T_{C12}	R8, R9; W6
C13	旅客捷运系统竣工验收	竣工验收	T_{C13}	R8, R9; W6
C14	竣工验收后续调试与问题整改	后续调试	T_{C14}	R8; W6

注：每个核心工序 C_i 均设置开始状态库所 $P_{C_i_start}$ 和完成状态库所 $P_{C_i_finish}$ ，时延参数为 $D(T_{C_i})$ 。资源约束：R1 车辆调试团队，R2 轨道调试团队，R3 供电配合，R4 信号调试团队，R5 站台区接口团队，R6 车站系统调试团队，R7 维修基地支撑，R8 综合联调指挥，R9 验收组织。窗口约束：W1 车辆上线动调窗口，W2 供电切换/送电窗口，W3 站台区接口测试窗口，W4 信号联锁/列控接口测试窗口，W5 综合联调组织窗口，W6 验收与问题整改窗口。C08 中的“—”表示无显著资源或窗口约束。

3.2. 赋时 Petri 网形式化定义

依据 Petri 网、时间 Petri 网及项目动态管理研究[14]-[16]，本文定义：

$$TPN = (P, T, A, M_0, D, R, W, C, G) \quad (1)$$

其中， P 、 T 、 A 、 M_0 、 D 、 R 、 W 、 C 和 G 分别表示库所、变迁、弧、初始标识、赋时、资源需求、窗口需求、容量和使能规则， M 为当前标识。相关集合为：

$$C = \{C_{01}, C_{02}, \dots, C_{14}\} \quad (2)$$

$$T = \{T_{C01}, T_{C02}, \dots, T_{C14}\} \quad (3)$$

$$P = P_S \cup P_F \cup P_R \cup P_W \quad (4)$$

P_S 、 P_F 、 P_R 和 P_W 分别表示开始、完成、资源和窗口库所。每个核心工序对应一个赋时变迁，满足使能条件后触发并在完成时输出 Token。

3.3. 工序逻辑关系与触发规则

工序逻辑及多前置约束的重要性由项目进度与资源受限调度研究支撑[9][10][12]。本文 17 条关系由 XER 计划日期、WBS 层级和工程逻辑推导。FS、SS 与多前置规则分别为：

$$start_j \geq finish_i + lag_{ij} \quad (5)$$

$$start_j \geq start_i + lag_{ij} \quad (6)$$

$$start_j \geq \max\{g_{ij}\} \quad (7)$$

其中， g_{ij} 为 FS 或 SS 关系计算的约束时间；多前置工序以全部约束时间最大值作为可触发时点，17 条核心工序逻辑关系及 FS/SS 约束见表 3。

Table 3. Core commissioning activity relationships and FS/SS constraints

表 3. 核心工序逻辑关系及 FS/SS 约束表

关系编号	前置工序	后续工序	关系类型	滞后/d	关系映射
L01	C01	C09	FS	93	C01→C09
L02	C02	C09	SS	243	C02→C09
L03	C03	C09	SS	62	C03→C09
L04	C04	C09	SS	243	C04→C09
L05	C07	C09	SS	108	C07→C09
L06	C09	C10	FS	1	C09→C10
L07	C02	C11	FS	152	C02→C11

续表

L08	C03	C11	FS	91	C03→C11
L09	C04	C11	FS	1	C04→C11
L10	C05	C11	FS	1	C05→C11
L11	C06	C11	FS	121	C06→C11
L12	C07	C11	FS	91	C07→C11
L13	C08	C11	FS	-60	C08→C11
L14	C10	C11	FS	1	C10→C11
L15	C11	C12	SS	60	C11→C12
L16	C11	C13	SS	61	C11→C13
L17	C13	C14	FS	1	C13→C14

注：FS 满足 $start_j \geq finish_i + lag_{ij}$ ；SS 满足 $start_j \geq start_i + lag_{ij}$ ；多前置工序满足 $start_j \geq \max\{g_{ij}\}$ 。表中 $C_i \rightarrow C_j$ 仅表示核心工序逻辑约束的关系映射，不属于 Petri 网弧集合 A 中的变迁至变迁直接连接；实际拓扑仍通过库所与变迁连接。

3.4. 资源与窗口约束建模

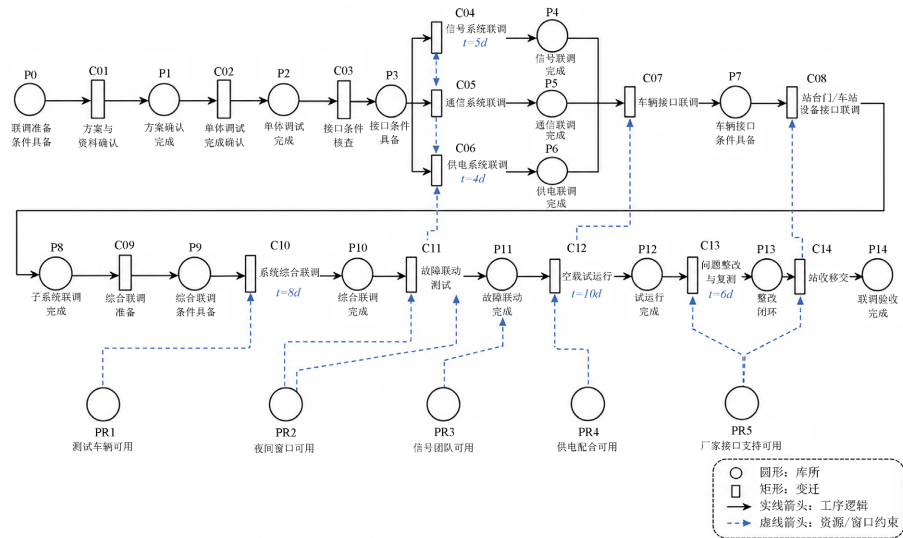
资源约束 Petri 网以资源库所 Token 表示可用容量并参与变迁使能[16] [17] [22]；本文进一步将不停航窗口表达为窗口库所。资源与窗口容量及使能条件为：

$$M_0(P_{Rk}) = C(r_k) \tag{8}$$

$$M(P_{Rk}) \geq R(T_{Ci}, r_k) \tag{9}$$

$$M_0(P_{Wm}) = C(w_m) \tag{10}$$

$$M(P_{Wm}) \geq W(T_{Ci}, w_m) \tag{11}$$



注：实线表示库所与变迁之间的流程弧；虚线表示工序逻辑、资源或窗口约束映射，不属于弧集合 A 中的直接弧。

Figure 2. Schematic diagram of the timed Petri net for the commissioning stage
图 2. 联调阶段赋时 Petri 网示意图

变迁触发前须同时满足逻辑、资源和窗口条件；Token 不足时进入相应等待，完成后释放 Token 并输出完成状态。模型核心结构见图 2。为避免图示过于复杂，14 个核心工序及其主要资源/窗口约束见表 2，17 条 FS/SS 逻辑控制关系见表 3。

3.5. S0/S1 情景共用模型结构

S0 优化前场景与 S1 优化情景采用相同 Petri 网拓扑、核心工序和 FS/SS 逻辑关系。S1 不删除必要前置条件，仅调整赋时参数、资源组织、窗口组织和整改复测组织间隔，具体见表 4。

Table 4. Scenario settings and simulation rules for S0 and S1

表 4. S0/S1 情景设定与仿真规则表

对比项	S0 优化前场景	S1 优化情景
工序集合	C01-C14	同 S0，不增删
逻辑关系	17 条 FS/SS 关系	同 S0，不改变必要前置条件
工期参数	S0 基准工期	按优化假设调整赋时参数；压缩关键工序及整改复测组织间隔
资源组织	S0 初始容量	关键控制工序优先；资源错峰
夜间窗口	常规窗口组织	动车调试、信号接口、综合联调及整改复测连续窗口
调度规则	先到先服务	关键控制工序优先；同等条件先到先服务
资源冲突	后触发工序等待	关键资源优先保障；非关键任务错峰
窗口冲突	窗口 Token 不足则等待	连续窗口组织，减少中断
整改复测	保留 C14 基准闭环	保留 C14；问题清单前置、资料预审、复测并行
终止条件	T_{C14} 完成并输出 P_{C14_finish} Token	同 S0

注：S1 优化情景不改变核心工程逻辑，不删除必要前置条件，仅调整赋时参数、资源组织、窗口组织和整改复测组织间隔；S1 为优化情景模拟设定，不代表实际施工结果。

3.6. 数据来源与参数边界

模型使用某枢纽机场旅客捷运系统工程 XER 原始数据与日期归并结果形成工序及 S0 赋时，以工程逻辑推导关系和约束需求，以脱敏/模拟假设设置资源、窗口及 S1 参数。S0 与 S1 共用模型拓扑，差异仅体现在参数和调度规则。为便于解释后续情景模拟结果，本文将“关键控制链日历跨度”定义为赋时 Petri 网一次运行踪迹中，对模型终止状态形成时间具有最长控制作用的变迁序列所对应的日历时间跨度。具体而言，以终止变迁 T_{C14} 完成并输出 P_{C14_finish} Token 为终点，沿前置逻辑、资源等待、窗口等待和整改复测等待的传递关系向前回溯，识别对终止时间具有控制作用的核心变迁序列；其日历跨度按该序列首个关键变迁的开始时间至 T_{C14} 完成时间计算。与传统关键路径相比，关键控制链不仅反映工序逻辑和持续时间，还纳入资源 Token 不足、窗口 Token 不足和多前置同步造成的等待，因此具有情景依赖性；在不考虑资源、窗口和等待因素时，其含义可近似退化为传统网络计划中的关键路径。

4. 模型运行与情景模拟结果

4.1. 情景设定和运行记录说明

S0 优化前场景采用基准工期、初始资源容量、常规夜间窗口和先到先服务规则；S1 优化情景保持相同 Petri 网拓扑、核心逻辑和必要前置条件，仅调整赋时、资源优先级、窗口及闭环组织。两类场景按照

第 3 节模型规则运行；S1 结果为优化情景模拟结果，不代表实际施工结果。

4.2. S0 场景关键等待与瓶颈工序

S0 运行日志显示，关键等待集中于 C09、C11、C13 和 C14，识别结果见表 5。C09 在前置条件满足后仍需等待供电、基地支撑及夜间窗口同步可用，是资源 - 窗口耦合等待的主要起点；C11 受多专业前置状态同步控制；C13 受综合联调状态、验收资源和复测窗口约束；C14 受验收完成、整改进展和复测条件控制，并决定模型终止。

Table 5. Waiting identification results for key activities in the S0 scenario
表 5. S0 场景关键工序等待识别结果

工序	阶段属性	主要等待类型	主要约束来源	影响对象
C09 车辆静态调试与动态调试	车辆调试	资源等待、窗口等待	供电及基地支撑、夜间窗口	后续车辆工序、C11
C11 综合联调	系统集成	前置条件等待	多专业及接口条件同步	C13
C13 竣工验收	验收组织	前置条件等待、资源等待、窗口等待	综合联调状态、验收资源及复测窗口	C14
C14 整改复测	收口闭环	前置验收完成等待、闭环收口等待	整改进展、复测资源及窗口	模型终止状态

4.3. 等待机制对工期的传递影响

模型将等待划分为前置条件、资源、窗口及整改复测闭环等待。S0 优化前场景的主要传递路径为：C09 车辆动调等待导致后续车辆交付与调试工序后移，继而影响 C11 综合联调，并传递至 C13 竣工验收和 C14 整改复测闭环。从 Petri 网运行看，前序变迁完成 Token 输出延迟，使后续变迁不能及时满足使能条件，形成连续等待。

4.4. S1 优化情景下关键工序运行变化

在 S1 参数设定下，C09 资源 Token 与窗口 Token 更早同步满足，C11 多前置条件更早满足；C13 仍可能受验收资源约束；C14 保留闭环和终止控制作用，但完成状态更早输出。上述变化均未删除必要前置条件或改变核心工程逻辑。

4.5. S0/S1 情景模拟结果对比

S0/S1 情景模拟结果见表 6。

Table 6. Comparison of simulation results between S0 and S1 scenarios
表 6. S0/S1 情景模拟结果对比表

指标名称	S0 优化前场景	S1 优化情景	改善值	改善率或提升率/%
系统级联调至整改闭环周期/d	216	168	48	22.22
关键控制链日历跨度/d	821	592	229	27.89
资源冲突次数/次	3	2	1	33.33
资源等待时间/d	155	36	119	76.77
夜间窗口额外等待时间/d	182	0	182	100.00

续表

整改复测闭环周期/d	92	64	28	30.43
窗口计划利用率/%	90.94	100.00	9.06 个百分点	9.96

注：对于越小越好的指标，改善率按 $(S0 - S1)/S0 \times 100\%$ 计算；窗口计划利用率提升率按 $(S1 - S0)/S0 \times 100\%$ 计算。
S1 数据均为优化情景模拟结果，不代表实际施工结果。夜间窗口额外等待时间为 0 d，仅表示设定的连续窗口条件下模型未记录因窗口 Token 不足造成的附加等待，不表示实际窗口风险消失；窗口计划利用率为模型计划口径。

进度类结果显示，系统级联调至整改闭环周期由 216 d 缩短至 168 d，关键控制链日历跨度由 821 d 缩短至 592 d；资源与窗口类结果中，资源等待时间由 155 d 降至 36 d；收口类结果中，整改复测闭环周期由 92 d 降至 64 d。上述差异均在核心工序集合与 FS/SS 逻辑关系保持不变条件下形成，属于优化情景模拟结果。

5. 讨论

本文将不停航施工约束由宏观组织要求转化为联调进度模型中的资源 - 窗口状态约束。既有研究分别关注不停航施工的安全与运行保障[1]-[3]以及 APM 系统集成和接口测试[4]-[8]，本文进一步将测试车辆、专业团队、供电配合、验收组织和夜间窗口转化为参与工序使能判断的资源库所、窗口库所与 Token 约束。C09 呈现的资源 - 窗口耦合等待说明，不停航条件会通过具体触发条件进入联调进度并沿后续逻辑传递。

赋时 Petri 网的作用在于解释联调工序为何等待以及等待如何传递。Petri 网及其扩展适合表达并发、同步、冲突、持续时间和资源状态[14]-[18]。本文将“能否开工”转化为前置逻辑、资源 Token 和窗口 Token 是否同步满足的问题，并借助 C09、C11、C13 和 C14 识别耦合等待、多前置同步、验收资源约束和整改复测闭环。该应用强化了对等待形成、传递与释放过程的解释，但不构成 Petri 网方法论创新。

本文方法与 CPM、PERT、关键链和资源受限调度方法具有互补关系。传统方法在逻辑排程、关键路径识别、资源配置和优化求解方面具有明确价值[10]-[13]；本文则从数据转化、约束表达和机制解释三个层面，将 XER 计划数据转化为赋时 Petri 网输入，将资源容量和不停航窗口转化为状态约束，并通过 S0/S1 情景识别等待传递和整改复测闭环。因此，该模型更适合作为传统排程方法的补充性分析工具。

本文模拟结果对联调计划组织的适用范围仍受数据脱敏、单案例和参数假设限制。模型发现提示，应围绕 C09 开展关键工序 - 资源 - 窗口协同治理，围绕 C11 实施前置界面清单化确认，并围绕 C14 将整改复测由尾项处理转为主控闭环管理。本文输入基于某枢纽机场旅客捷运系统工程的 XER 日期归并、工程逻辑推导和脱敏/模拟假设，S1 为优化情景模拟结果，不代表实际施工结果或最终工期预测。模型适用于识别瓶颈和比较组织策略相对效果，实际应用仍需以完整逻辑、资源日历、窗口审批和整改记录进行校准。

6. 结论

本文构建了面向不停航施工条件下机场 APM 联调阶段的赋时 Petri 网模型。研究表明，多专业接口、关键资源、作业窗口和整改复测闭环共同影响工序触发并形成等待传递，进度控制应转向关键约束识别、资源窗口协同和闭环控制。本文将资源与窗口转化为库所和 Token 约束，并建立 XER 数据处理、工序归并、关系推导、赋时 Petri 网建模与情景模拟路径。在不改变核心逻辑和必要前置条件下，S1 优化情景模拟中系统级联调至整改闭环周期由 216 d 降至 168 d，资源等待时间由 155 d 降至 36 d；该结果不代表实际施工结果。

需要说明的是，本文模型属于确定性情景模拟模型，其目的在于识别联调进度瓶颈并比较不同组织

策略的相对效果,而非对实际工期进行精确预测。受工程数据脱敏和研究边界限制,模型中的工期参数、资源容量、作业窗口及 S1 优化情景均包含脱敏处理或模拟假设;同时,模型尚未充分刻画工序持续时间、资源可用性、窗口审批、现场协调、问题整改返工等因素的随机波动。由于研究基于单一机场 APM 案例,结论的外推性仍需谨慎。后续研究可进一步引入不确定性建模与蒙特卡洛仿真,构建随机 Petri 网或随机赋时 Petri 网模型;同时结合多案例数据进行验证,并利用完整 TASKPRED 关系、真实资源日历、窗口审批记录和整改复测台账对模型参数与逻辑关系进行校准,以提升模型在实际项目进度管理中的解释力和适用性。总体而言,本文为不停航施工条件下机场复杂系统联调阶段的进度计划编制、关键约束识别、资源窗口协同配置和进度优化决策提供了工程管理层面的分析框架与方法支撑,并为大型枢纽工程复杂系统集成阶段的计划优化提供参考。

参考文献

- [1] 李建华, 汤亮, 敖翔, 等. 机场不停航施工组织管理[J]. 工程建设与设计, 2021(12): 185-187.
- [2] 潘溪平. 民航机场飞行区扩建工程不停航施工项目管理[J]. 管理工程学报, 2005, 19(增刊): 138-143.
- [3] 张锦彬. 上海浦东国际机场 T2 捷运车站不停航状态下的施工专项措施[J]. 建筑施工, 2018, 40(6): 896-898.
- [4] 张悦. 浦东国际机场旅客捷运系统建设管理综述[J]. 上海机场, 2020(25): 70-76.
- [5] 尹燕萍, 陆宗彬. 自动旅客运输系统集成研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(10): 32-35.
- [6] 王嘉鑫. 浦江线全自动旅客捷运系统(APM)的系统集成及应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [7] 肖涛, 尹燕萍. 机场 APM 信号系统外部接口测试研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(4): 57-60.
- [8] 周通. 上海浦东国际机场旅客捷运系统维保工作优化措施[J]. 城市轨道交通研究, 2022(S1): 123-125.
- [9] 邱杨扬. 不停航施工期飞行区安全风险演化的复杂网络模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [10] 王小康, 张强, 徐其涛, 等. 关键链方法在飞行区作业编排中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2024(10): 53-56.
- [11] 付涵, 管在林, 王创剑. 基于关键链带时间窗约束的市政工程项目计划与调度[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(5): 176-183.
- [12] Hatami-Moghaddam, L., Khalilzadeh, M., Shahsavari-Pour, N. and Sajadi, S.M. (2024) Developing a Robust Multi-Skill, Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Model with Partial Preemption, Resource Leveling, and Time Windows. *Mathematics*, **12**, Article No. 3129. <https://doi.org/10.3390/math12193129>
- [13] Wang, H., Lappas, N.H. and Gounaris, C.E. (2019) Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling with Alternative Prerequisites: New Models and Computational Studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **58**, 18253-18266. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02455>
- [14] Murata, T. (1989) Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, **77**, 541-580. <https://doi.org/10.1109/5.24143>
- [15] 杨旭, 沈俊鑫. 时间 Petri 网在项目进度管理建模中的应用[J]. 价值工程, 2014(22): 4-7.
- [16] 沈俊鑫, 郭晓军. 基于 Petri 网的项目管理模型研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 101-108.
- [17] Jeske de Freitas, J.C. and Julia, S. (2016) Fuzzy Resource-Constrained Time Workflow Nets. In: Latifi, S., Ed., *Information Technology: New Generations*, Springer International Publishing, 543-553. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32467-8_48
- [18] 高云. 基于 WBS 和 Petri 网的项目计划反馈模型构建[J]. 项目管理技术, 2018, 16(6): 52-56.
- [19] Vidosavljevic, A. and Tosic, V. (2010) Modeling of Turnaround Process Using Petri Nets. In: *Air Transport Research Society World Conference*, Air Transport Research Society, 1-13.
- [20] 李鸿, 倪枫, 刘文诚, 等. 约束条件下项目进度关键路径的 Petri 网建模方法[J]. 软件工程, 2024, 27(4): 54-59.
- [21] 张江琛, 张寿明. 基于 Petri 网的机场飞行区建模仿真[J]. 计算机仿真, 2025, 42(7): 289-293.
- [22] Medina-Marin, J., Serna-Diaz, M.G., Hernandez-Romero, N., et al. (2023) Buffer Allocation Problem Modeling by Means of Timed Petri Nets. *35th European Modeling & Simulation Symposium*, Athens, 18-20 September 2023, 272-278. <https://doi.org/10.46354/i3m.2023.emss.041>