

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.020

基于着色时间 Petri 网的飞机维修保障作业优化

齐 阳, 祝华远, 李江龙, 崔骏夫
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对舰基特殊条件下飞机的维修保障作业受限制问题, 提出基于着色时间 Petri 网的飞机维修保障作业模型。利用 ECRS 法优化现有作业流程并使用着色时间 Petri 网以机械检查工序为例建立飞机维修保障作业模型。通过优化机械检查流程, 并对不同维修人员组合的维修时间进行仿真, 得出串行工序的优先级、并行到串行转换的影响以及整体效率优化的结果。仿真结果表明: 该模型能够在维修保障资源受限情况下, 得到资源配置最优组合, 对缩短维修时间, 提高维修资源利用率, 提升飞机放飞时效有一定指导意义。

关键词: 维修保障; 着色时间 Petri 网; 资源配置优化; 流程优化; 仿真分析; ECRS 方法

中图分类号: V267 **文献标志码:** A

Aircraft Maintenance Support Operation Optimization Based on Colored Timed Petri Net

Qi Yang, Zhu Huayuan, Li Jianglong, Cui Junfu
(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the problem that the maintenance support operation of aircraft is restricted under the special conditions of ship-based, an aircraft maintenance support operation model based on colored time Petri net is proposed. The ECRS method is used to optimize the existing operation process, and the colored time Petri net is used to establish the aircraft maintenance support operation model by taking the mechanical inspection process as an example. By optimizing the mechanical inspection process and simulating the maintenance time of different maintenance personnel combinations, the priority of serial processes, the impact of parallel to serial conversion and the overall efficiency optimization results are obtained. The simulation results show that the model can obtain the optimal combination of resource allocation in the case of limited maintenance support resources, which has a certain guiding significance for shortening the maintenance time, improving the utilization rate of maintenance resources and enhancing the flight timeliness of aircraft.

Keywords: maintenance support; colored time Petri net; resource allocation optimization; process optimization; simulation analysis; ECRS method

0 引言

舰基条件下, 飞行准备因舰船空间有限, 面临复杂的资源管理和调配问题^[1], 各类设施和资源都需要精细规划和高效利用。当飞机进行起降、维护、加油、弹药补给等作业时, 多个工序可能会同时对同一资源产生需求, 如停机坪、油料供应系统、弹药库、维修设施或专业人员等; 因此, 舰基条件下, 资源的优化配置是确保飞机机务准备高效运作的关键。

Petri 网是一种图形化的数学建模工具, 被广泛应用于系统建模、流程分析和资源优化配置等领域。它能够有效描述和分析维修过程中多任务共享资源时出现的冲突现象, 以及对维修工序各种状态和资源进行的量化分析。王嘉丰等^[2]针对着色逻辑 Petri

网存在的表达能力弱以及适用范围窄的问题, 提出了带有时间戳的着色逻辑 Petri 网, 并用实例说明了该模型能够适用于传递复杂数据流、存储资源有限等情况。Giro 等^[3]展示了如何将 Petri 网扩展以允许设置时间约束并阐述了如何将时间 Petri 网编码到 DEVS 模型中, 从而为模拟 workflow 系统提供指导。张原等^[4]针对航空装备日常维修训练周期长、费用高等难题, 建立基于 Petri 网的航空装备虚拟维修训练仿真模型。Sabino 等^[5]使用随机 Petri 网模拟火灾监控系统结构并评估其性能。得到能够调整组件的资源能力和服务时间的多场景检测模型。高颖杰等^[6]为解决维修工作分析方法在装备维修资源预测中存在的不足, 提出了一种用维修工作 Petri 网来描述装备维修过程的方法并以某装备液压机构的故障

收稿日期: 2024-08-23; 修回日期: 2024-09-15

第一作者: 齐 阳(1987—), 男, 山东人。

维修为例, 建立 MTPN 模型, 得出了所需维修资源的种类和数量。郑重等^[7]针对以往确定维修资源方法中所存在的问题, 提出了一种基于着色时间 Petri 网的维修资源确定方法, 并结合实例进行了分析, 结果表明该方法具有较高的使用价值。张光宇等^[8]在传统 Petri 网的基础上, 利用层次建模方法, 与工作方法结合, 给出基于层次 Petri 网的工作流网定义, 并将其运用到航空装备的维修流程建模上。曲长征等^[9-11]针对基本 Petri 网在建立多种任务共享多类资源情况下的复杂并行维修过程时存在的结构复杂化问题, 建立了考虑多类资源的多任务并行维修过程模型。Zhang 等^[12]使用改进 Petri 网建立了特殊车辆的故障维修模型, 并通过实例预测维修时间。

时间 Petri 网和着色 Petri 网均是 Petri 网的扩展形式^[13-16], 前者在传统的 Petri 网基础上引入了时间因素, 使得模型能够表达事件发生的时间顺序和持续时间。时间 Petri 网通常用于对实时系统、制造系统、作业流程等具有时间约束的系统的建模和分析; 后者引入了“颜色”或“类型”的概念来丰富对资源的描述。与传统的 Petri 网中所有资源被视为同质且无特性的元素不同, 着色 Petri 网中的每个令牌可以携带独特的属性或值。这一特性显著增强了模型的描述精度和分析深度, 使其能够更细致入微地刻画模型的动态状态。对于舰基条件下资源紧张且维修作业工序注重时效的模型, 笔者结合 Petri 网进行建模分析, 以开展资源优化配置。

1 Petri 网相关定义

基本 Petri 网包含库所、变迁和弧 3 项元素。库所表示模型中各类状态; 变迁表示引起各类状态变化的事件; 弧则用于连接状态和事件。定义基本 Petri 网 PN 为 (P, T, F) 的三元组^[17-18], 其中 $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 为有穷库所集, $T=\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 为有穷变迁集, F 为 P 和 T 之间的有向弧集合, PN 满足: $P \cap T = \emptyset$; $P \cup T \neq \emptyset$; $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ (“ $\times$ ”为笛卡尔积, 有向弧集合仅在元素 P 与 T 之间)。

时间 Petri 网 TPN 则是在基本 Petri 网的基础上, 扩展了时间区间函数 S 和初始状态 M_0 , $TPN=(P, T, F, S, M_0)$ 。 S 为时间函数, $S=[EFT(t), LFT(t)]$, $EFT(t)$ 为变迁最早发生的时间函数, $LFT(t)$ 为变迁最晚发生的时间函数^[19-22]。

着色时间 Petri 网为七元组 $CTPN=(P, T, F, S, M_0, C)$ 。 C 为有限非空颜色的集合, 一般称之为颜

色集。

2 问题描述

舰基条件下, 飞机维修保障作业受空间和维修资源双重限制, 若无法有效利用有限维修保障资源, 会导致机务准备工作迟滞, 影响飞机起飞着降效率。此外, 现行维护规程当中, 针对飞行机务准备的各项检查内容多为线性作业, 而线性作业模式往往难以匹配时间紧资源少的舰基条件; 因此, 笔者拟对机务准备中的机械检查进行建模并仿真, 研究如何重构流程和人员的配置, 从而优化工作效率, 提升舰面放飞时效。

对于飞机维修保障过程中时间空间、人员、备品备件等条件有限且动态变化的情况, 传统分析方法建模效果不佳, 而依托着色时间 Petri 网可在各类保障资源冲突的条件下, 建立作业模型, 模拟保障流程, 开展优化分析。

3 维修保障作业建模与分析

3.1 飞行任务前机械检查流程优化

飞机准备执行飞行任务时, 假设机械专业有如下检查工作:

- 1) 拆除发动机、散热器进气道排气管的堵塞器, 拆除静压通气口盲盖;
- 2) 检查 3 个起落架舱;
- 3) 检查轮胎压力;
- 4) 检查起落架机械液压设备状况;
- 5) 打开蓄电池并检查;
- 6) 检查压气机叶片;
- 7) 检查尾钩固定情况;
- 8) 检查座舱内机械装置情况;
- 9) 打开燃油箱液压系统发泄开关, 检查发泄开关情况;
- 10) 检查液压油, 发动机滑油箱油面高度, 测试液压油压力;
- 11) 检查完毕, 拧紧油箱舱泄漏口的堵塞器, 锁紧左右减速器, 发动机, 散热器进气道的整流罩等。

如前所述, 该作业流程为线性顺序, 易造成人员、设备资源、时间的浪费。这里采用“5W1H”和“ECRS”^[23-25]法对该作业流程优化分析, 如表 1 所示。ECRS 是一种用于工作流程改进和效率提升的方法论, 主要应用于工业工程、生产管理、业务

流程优化等领域,目的是通过系统性的分析和改进, 去除浪费, 提高工作效率和生产力。

表 1 “5W1H” 和 “ECRS” 法分析

检修过程	Why(原因)	What(对象)	When(时间)	Where(地点)	Who(谁)	How(方法)	ECRS
拆除堵塞器, 盲盖	开始检查	堵塞器	t_1	发动机舱	2	拆下以便检测	往后调整
起落架检查	外观检查	起落架、轮胎	t_2	起落架舱	3	简单检查	调整在最前面
蓄电池检查	性能检查	蓄电池	t_3	前起落架和发 动机舱中间	2	拆装检查	调整为并行
压气机与尾钩检查	外观检查	压气机叶片, 尾钩	t_4	飞机后部尾钩, 左右喷气口	2	简单检查	往后调整
座舱机械检查	机械检查	座舱内机械装置	t_5	座舱	1	机械检查	调整为并行
燃油器检查	开关检查	燃油箱发泄开关	t_6	燃油箱	1	简单检查	调整为并行
液压油检查	油面检查	油箱	t_7	发动机舱	1	简单检查	调整为并行
检查完毕拧紧堵塞整流罩	完成检查	阻塞器	t_8	发动机舱	2	装配, 完成检查	调整为并行

基于 ECRS 流程化分析法对前述保障流程进行优化, 结合 Why、What、When、Where、Who、How 等方面因素入手, 综合运用消除、合并、重组、简化方法进行优化, 具体的工作内容如下所示:

1) 消除。起落架舱检查、轮胎检查和起落架机械液压设备状况关联度较高, 检查的对象都是在起落架部位, 站位相同, 为避免重复, 所以可以取消单独的检查。

2) 合并。检查压气机叶片和检查尾钩固定情况检查时间消耗接近, 共组地点分别在不同部位, 所以可以同时开展, 因此可以进行合并为 2 人同时进行处理。

3) 重组。检查 3 个起落架舱, 检查轮胎压力和机械液压设备状况需要 3 人同时进行, 因此, 优先置于前面。

4) 简化。根据维修保障人员的数量及工作地点等因素, 将部分流程根据消耗的时间进行流程简化, 打开燃油箱液压系统发泄开关, 检查发泄开关情况

和检查液压油, 发动机滑油箱油面高度, 测试液压油压力整体时间与蓄电池检查相同, 可并行进行; 检查座舱内机械设备可以和拧紧油箱舱泄漏口的堵塞器、锁紧左右减速器、发动机、散热器进气道的整流罩等同时进行, 调整为并行, 因此可以通过并行简化流程, 从而缩短总时长。

综上, 可得出新检修流程如图 1 所示。

3.2 飞机作业保障流程着色时间 Petri 网建模

建立飞机作业保障流程着色时间 Petri 网 $CTPN=(P, T, F, S, M_0, C)$, P 为有限非空的库所元素的集合, 表示机械检查过程中的各类状态; T 为有限非空的变迁元素的集合, 表示检查过程中的所有工作; F 为弧的集合, 表示各类状态与工作之间的变化关系; S 为非负时间的集合, $\forall T_i \in T, r_{ab} \in R$, 对于任意变迁 T_i , 都有一个时间区间 r_{ab} 对应, 表示每项检查状态发生的时间区间; C 为有限非空的颜色集合, 与每个库变迁相关联, 表示各类资源的具体特点。

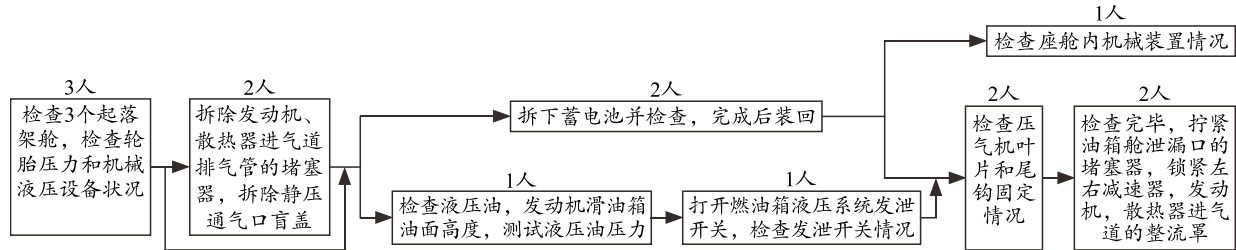


图 1 飞行任务前机械检查流程优化

3.3 建立颜色集

建立飞机飞行任务前机械检查颜色集 $C=\{b_1, b_2\}$ 。 b_1 代表维修技术为“优秀”的保障人员, b_2 代表维修技术为“良好”的保障人员, 根据一线调研, 优秀人员和良好人员的比例为 1:2。利用 Petri 网建模软件 CPNTOOLS 对图 1 所示流程建立飞机

飞行任务前机械检查着色时间 Petri 网模型如图 2 所示。需要说明的是, P_1 至 T_2 的过程中仅需 2 人, 闲置人数 k' (粗线) 的去向根据 P_2 至 T_3 和 T_5 的情况具体分析, 例如 P_2 至 T_3 分配 1 人, 至 T_5 分配 1 人, 则 P_1 至 T_3 需分配 1 人, 至 T_5 无需分配人员; 若 P_2 的人员全部分配至 T_3 , 则 P_1 无需分配人员至 T_3 , 需分配 1 人至 T_5 。

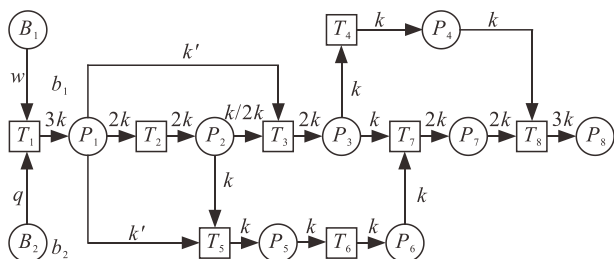


图 2 飞机飞行任务前机械检查着色时间 Petri 网模型

飞行任务前机械检查着色时间 Petri 网模型元素含义如表 2 所示。

表 2 执行任务前的机械检查中的着色 Petri 网模型元素

库所	变迁	参数
B_1 优秀水平人员	T_1 起落架检查	b_1 优秀水平保障人员
B_2 良好水平人员	T_2 拆除堵塞器, 盲盖	b_2 良好水平保障人员
P_1 起落架检查完毕	T_3 蓄电池检查	w 工作起始所用优秀人员数
P_2 拆除完毕	T_4 座舱机械检查	q 工作起始所用良好人员数
P_3 蓄电池检查完毕	T_5 液压油检查	k 工作起始所用人数为 1
P_4 座舱机械检查完毕	T_6 燃油器检查	$2k$ 工作起始所用人数为 2
P_5 液压油检查完毕	T_7 压气机与尾钩检查	$3k$ 工作起始所用人数为 3
P_6 燃油器检查完毕	T_8 检查完毕拧紧堵塞整流罩	k' 闲置人员数
P_7 压气机与尾钩检查完毕	-	-
P_8 检查完毕	-	-

可达图是描述 Petri 网在初始标记下,所有可能到达的状态 M 的转换过程, M 向量中的元素为机械检查工作中各库所的资源值。根据以上内容,可以画出模型可达图,初始状态为 M_0 ,各状态如图 3 所示。

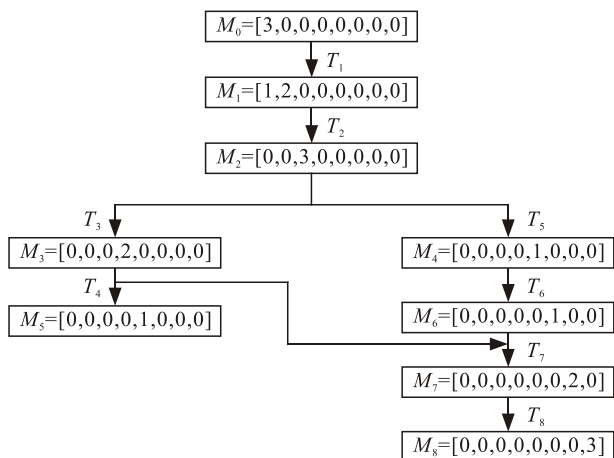


图 3 飞行任务前机械检查路径可达图

通过对飞行任务前机械检查着色时间 Petri 网 CTPN= (P, T, F, S, M_0, C) 可达图进行分析可知:该模型存在末端节点 M_8 ,即所有资源从初始状态转移至

最终状态,模型未出现死锁,因此模型存在终止状态且此模型可达。

根据图 2 所建模型,得出如表 3 所示飞行任务前机械检查人员组合方案表。

得出 6 种组合的依据一方面是涉及 2 人配合的工作包括[优秀,良好]和[良好,良好] 2 种方案,另一方面是涉及单人工作时需考虑其他并行工序中是否有人员被占用,若优秀人员被占用,则由良好人员单人工作并开展后续作业,若良好人员被占用,则由优秀人员单人工作并开展后续作业。

表 3 飞行任务前机械检查人员组合方案

变迁	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6
T_1	b_1+2b_2	b_1+2b_2	b_1+2b_2	b_1+2b_2	b_1+2b_2	b_1+2b_2
T_2	b_1+b_2	b_1+b_2	b_1+b_2	$2b_2$	$2b_2$	$2b_2$
T_3	b_1+b_2	b_1+b_2	$2b_2$	$2b_2$	b_1+b_2	b_1+b_2
T_4	b_1	b_2	b_2	b_2	b_1	b_2
T_5	b_2	b_2	b_1	b_1	b_2	b_2
T_6	b_2	b_2	b_1	b_1	b_2	b_2
T_7	$2b_2$	b_1+b_2	b_1+b_2	b_1+b_2	$2b_2$	b_1+b_2
T_8	$2b_2$	b_1+b_2	b_1+b_2	b_1+b_2	$2b_2$	b_1+b_2

3.4 基于着色时间 Petri 网的仿真分析

为了精确仿真,科学分析不同保障人员参与检修作业的用时,分析直接机务准备主要耗时环节和存在的问题,需要知道不同技术水平维修保障人员完成各检修作业流程的平均时间区间 $S=[EFT(t), LFT(t)]$,即完成时间不会早于区间最小值 $EFT(t)$,也不会超过区间最大值 $LFT(t)$ 。并作出以下假设:

1) 经一线调研统计得到维修保障人员完成机械检查的工时参数如表 4 所示。其中,维修保障人员优秀和良好 2 个等级间的维修工时差异系数是 1.5。

表 4 保障人员各检修作业流程人均工时 min

作业流程	优秀 μ	良好 μ	方差 σ
T_1 起落架检查	2.00	3	0.32
T_2 拆除堵塞器, 盲盖	4.00	6	0.81
T_3 蓄电池检查	2.67	4	0.38
T_4 座舱机械检查	2.67	4	0.37
T_5 液压油检查	1.33	2	0.15
T_6 燃油器检查	1.33	2	0.13
T_7 压气机与尾钩检查	3.33	5	0.45
T_8 检查完毕拧紧堵塞整流罩	4.00	6	0.76

2) 在维修保障过程中,各人员的发挥是一个平稳随机过程,所有流程开展是在正常战训条件下完成的,未发生突发紧急情况;因此,人均工时分布为正态分布,以均值 $\mu \pm 3\sigma$ 作为 $S=[EFT(t), LFT(t)]$ 的着色时间 Petri 网的时间区间。均值 μ 和 σ 值根据调研数据计算得出。

在基于以上条件基础上,对表 3 人员组合进行 100 次仿真计算,得到表 5 仿真统计结果。

通过仿真分析发现,在机械检查作业中采用人

员分配组合 3 能够实现最短用时。具体而言，对于串行工序 T_2 拆除堵塞器和盲盖，优秀和良好人员的搭配优于两个良好人员的配置，因此排除了组合 4、5、6。在并行结构中，尽管优秀和良好人员在 T_3 蓄电池检查工序的表现优于 2 名良好人员，但若由优秀人员执行 T_4 座舱机械检查，则导致后续并行转

串行的 T_7 压气机与尾钩检查和 T_8 拧紧堵塞盖和整流罩工序均为良好人员操作，延长了总用时，因此排除组合 1。若由良好人员执行 T_4 座舱机械检查，则虽然并行转串行的工序为优秀加良好的搭配，但由于优秀人员介入较晚，用时仍非最优，故排除组合 2。

表 5 保障人员不同组合的工时仿真结果 min

变迁	组合 1	时间	组合 2	时间	组合 3	时间	组合 4	时间	组合 5	时间	组合 6	时间
T_1	b_1+2b_2	8.01	b_1+2b_2	8.08	b_1+2b_2	7.94	b_1+2b_2	7.93	b_1+2b_2	8.06	b_1+2b_2	7.93
T_2	b_1+b_2	10.02	b_1+b_2	10.07	b_1+b_2	9.84	$2b_2$	12.04	$2b_2$	12.22	$2b_2$	11.89
T_3	b_1+b_2	6.70	b_1+b_2	7.88	$2b_2$	6.63	$2b_2$	7.93	b_1+b_2	6.68	b_1+b_2	6.67
T_4	b_1	2.74	b_2	4.02	b_2	4.05	b_2	4.02	b_1	2.68	b_2	2.72
T_5	b_2	2.02	b_2	1.33	b_1	1.99	b_1	1.31	b_2	2.02	b_2	2.00
T_6	b_2	1.97	b_2	1.34	b_1	2.00	b_1	1.30	b_2	1.97	b_2	1.98
T_7	$2b_2$	9.93	b_1+b_2	8.44	b_1+b_2	8.36	b_1+b_2	8.27	$2b_2$	10.16	b_1+b_2	8.35
T_8	$2b_2$	11.83	b_1+b_2	10.10	b_1+b_2	10.09	b_1+b_2	9.98	$2b_2$	12.28	b_1+b_2	10.10
总工时	-	53.23	-	51.26	-	50.90	-	52.79	-	56.06	-	51.64

综上，在面对非串联作业流程时，有必要依据人员业务水平确定特定作业方案以提质增效，相关结论如下：1) 串行工序的优先级：优秀水平组合优于良好水平组合；2) 并行到串行转换的影响：即使特定步骤由优秀人员执行，若后续流程由并行变为串行且由良好人员操作，可能会抵消前序积累的时间优势；3) 整体效率优化：需要在关键节点合理分配高水平人员，同时确保后续并行工序的平衡，以避免瓶颈。

4 结束语

笔者对舰基特殊条件下机械检查的基本流程和作业程序进行了梳理，并结合 5W1H 和 ECRS 法对该工作予以优化分析。通过着色时间 Petri 网仿真，得到了维修作业的人员调配优化建议，为舰面保障资源受限情形下开展维修作业提供了一定的指导意义。

不足之处在于：一方面，仅探讨了人员调配及工序的优化方案，未综合考虑多项维修保障资源共同作用的复杂模型，未来将扩充 Petri 网颜色集，构建更全面的优化模型；另一方面，未考虑变迁时延，下一步将引入人员调动、工序延迟等时延变量，更细致地呈现实际作业情况。

参考文献：

[1] 刘东, 吴家仁, 周一舟, 等. 舰载机综合保障技术实践及发展展望[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 18.
[2] 王嘉丰, 徐贤. 带有时间戳的着色逻辑 Petri 网[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(7): 1776-1791.

[3] GIRO S, FRYDMAN C. Simulation Of Petri Nets With Multiple Instances Using Devs[C]//The 7th International Conference on Modeling and Simulation, Paris, 2008: 1-12.
[4] 张原, 李璇. Petri 网作用下航空装备虚拟维修训练仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 52-56.
[5] SABINO A, LIMA L N, BRITO C, et al. Forest Fire Monitoring System Supported by Unmanned Aerial Vehicles and Edge Computing: a Performance Evaluation Using Petri Nets[J]. Cluster Computing, 2024, 27(7): 9735-9755.
[6] 高颖杰, 曹继平, 杨阅兵. 基于改进 Petri 网的装备维修资源需求预测[J]. 兵工自动化, 2021, 2(40): 81-84.
[7] 郑重, 徐廷学, 王相飞. 基于着色时间 Petri 网的装备维修资源确定方法[J]. 舰船科学技术, 2011, 2(33): 131-133, 143.
[8] 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.
[9] 曲长征, 吴向东, 陈玉波, 等. 考虑多类资源的多任务并行维修过程 Petri 网建模[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(6): 45-48.
[10] 曲长征, 于永利, 郝建平, 等. 面向非计划维修停机时间分析的装备维修过程有色 Petri 网模型[J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1271-1275.
[11] 曲长征, 王松山, 高鲁. 考虑资源共享的维修过程建模及资源配置研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(4): 56-60.
[12] ZHANG H, TIAN S, SHAO X, et al. Petri Net-Based Prediction of the Maintenance Time of a Special Vehicle Model[C]//International Conference on Artificial Intelligence, Robotics, and Communication. Springer, Singapore, 2023.