文章编号:1673-0291(2026)01-0113-16 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250037

基于随机Petri网的多层级航班地面保障流程性能分析

吕澄莹,张生润,唐小卫,张 月
(南京航空航天大学 民航学院,南京 211106)

摘 要:针对航班地面保障实际作业流程的精准刻画与性能评估,提出一种多层级航班地面保障随机Petri网(Stochastic Petri Net,SPN)构建及性能分析方法.将保障节点间的衔接过程与保障节点进行过程同时作为随机Petri网的变迁,构建多层级航班地面保障SPN模型解析保障全流程复杂的串并联关系.采用时间性能等价化简方法降低模型分析的难度,在此基础上建立同构马尔科夫链对模型进行性能分析,得到多层级航班地面保障流程SPN模型的库所繁忙率和变迁利用率.建立的输入输出库所繁忙率四象限图可直观揭示流程中的低效与高效运行区域,实现保障节点及衔接过程前后续状态的精准分类,结合变迁利用率结果,并基于变迁平均发生速率动态变化过程中稳态概率累计变化量识别关键保障节点或衔接,包括4个关键保障节点及6个关键节点间的衔接.研究结果表明:航班地面保障的关键部分多集中在前后衔接不紧密的不同节点间,如餐食及机供品配供完成后等待关客舱门衔接过程,即使单个保障节点的作业时间较短,但若其前续准备或后续完成状态耗时较长,易导致整体保障效率降低;当关键保障节点或衔接平均发生速率超过0.2,即对应持续时间缩短至5 min后,保障流程整体持续时间下降趋于稳定.研究成果可以为机场协同决策下目标撤轮挡时间预测准确性的提高及促进机坪运行保障效率提供理论基础和方法支撑.

关键词:航班地面保障;随机Petri网;马尔科夫链;性能分析;性能等价化简
中图分类号:V351 **文献标志码**:A

Performance analysis of multi-level flight ground handling process based on stochastic petri nets

LYU Chengying, ZHANG Shengrun, TANG Xiaowei, ZHANG Yue
(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To accurately characterize and evaluate the performance of flight ground handling operations, this study proposes a method for constructing and analyzing multi-level Stochastic Petri Net (SPN) models of ground handling processes. Both the execution of handling tasks and the connections between handling nodes are modeled as transitions in the SPN, capturing the complex series-parallel relationships across the entire process. A time-performance equivalence simplification method is applied to reduce analytical complexity, after which an isomorphic Markov chain is used to evaluate per-

收稿日期:2025-03-12;**修回日期**:2025-04-28
基金项目:国家自然科学基金(U2233208);中央高校基本科研业务费专项基金(3082024NS2024043);南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划资助项目(xcxjh20240719)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China(U2233208); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3082024NS2024043); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of NUAA(xcxjh20240719)
第一作者:吕澄莹(2001—),女,陕西汉中人,硕士生.研究方向为机场运行管理.**email**:sx2307101@nuaa.edu.cn.
通信作者:张生润(1985—),女,甘肃白银人,副教授,博士. **email**:zhangshengrun@nuaa.edu.cn.

引用格式:吕澄莹,张生润,唐小卫,等.基于随机Petri网的多层级航班地面保障流程性能分析[J].北京交通大学学报,2026,50(1):113-128.
LYU Chengying, ZHANG Shengrun, TANG Xiaowei, et al. Performance analysis of multi-level flight ground handling process based on stochastic petri nets[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2026,50(1):113-128.(in Chinese)

formance, yielding place occupancy (busy) rates and transition utilizations for the multi-level SPN model. An input-output place-occupancy quadrant diagram visually highlights high- and low-efficiency areas in the process, enabling precise classification of pre-connection and post-connection states. By combining this with transition results and analyzing the cumulative change in steady-state probabilities under dynamic variations of mean transition rates, critical handling nodes and connections are identified, including four critical nodes and six key inter-node connections. Results indicate that critical part often occur at loosely connected nodes, such as the post-catering and in-flight supply connections to cabin door closure. Even when individual task durations are short, prolonged preceding or subsequent states can reduce overall handling efficiency. Furthermore, when the mean occurrence rate of a critical node or connection exceeds 0.2, corresponding to a duration reduced to 5 minutes, the overall process duration stabilizes. This study provides theoretical support and practical guidance for improving turnaround time prediction accuracy and enhancing ramp operation efficiency under collaborative airport decision-making.

Keywords: flight ground handing; stochastic petri net; Markov chain; performance analysis; performance equivalence simplification

随着航空运输市场的不断扩大,民航机场航班量稳步上升,航空公司飞行小时数不断增加.与此同时,有限的资源下机场承载压力逐渐增长,航班准点率的保障愈发困难.航班地面保障指航空器滑入指定机位上轮挡后针对旅客、货邮、航空器开展的一系列保障作业任务过程,直接影响航班正常率和机场的运行效率[1].因此,深入研究机场航班地面保障流程,对其进行网络构建及性能评估,识别流程中的关键节点,对缩短航班地面保障流程时间、提高机场整体运行效率有着十分重要的现实意义.

航班地面保障流程涉及多个保障节点,流程结构复杂,节点间不仅存在复杂的串并联关系,还具有明显的层级结构特性.早期研究以关键路径法(Critical Path Method,CPM)为核心,聚焦于部分保障节点.文献[2]为了提高停机位利用率,首次利用CPM确定了7种类型航班的保障流程关键路径,虽然有助于识别流程瓶颈,但其仍局限于部分保障节点.文献[3]进一步将蒙特卡罗模拟与关键路径法结合,引入随机性因素模拟保障时间的波动性,但其分析范围仍受限于关键路径上的节点.

为突破仅针对部分保障节点的局限,提升对整体保障流程的结构刻画,部分学者提出利用网络拓扑建模,如AOE(Activity on Edge)网络[4]、AOV(Activity on Vertex)网络[5]、STN(Simple Temporal Network)模型[6-7],通过节点与连边的方式刻画了流程的基本拓扑结构,但对节点间的时序关系及流程的层级特征考虑较为粗略,且忽略了保障流程中的随机性,难以精准刻画实际运行状态下的流程动态特性.文献[8]提出一种多马尔可夫链的航班客舱保障过程预测方法,虽提升随机性的刻画能力,但仍将流程简化为线性链,未体现实际保障流程中的并联环节.文献[9]考虑机位地理信息,建立时空网络模型,提高了描述运行态势特征的准确性,但在流程刻画方面,未考虑保障流程的层级结构特性.

在研究方法方面,部分研究采用计算机仿真软件模拟航班地面保障过程.文献[10]从航班地面保障过程时间维度出发,仿真模拟了飞机过站的整个过程,但抽象化处理任务结构,未考虑保障节点间的衔接时间.文献[11]将系统动力学原理引入飞机地面处理过程,并利用仿真模型分析飞机的运行能力及地面保障鲁棒性,但难以描述实际运行中存在的并行任务.文献[12]利用AirTop软件建立了武汉机场地面保障仿真模型,重点分析了机场运行保障资源分配,缺少地面保障流程结构刻画.文献[13]通过构建基于场面运行的多Agent离散仿真模型,提升了机场靠桥率与航班正常性的协同优化效果,但Agent行为规则未嵌入地面保障节点时序关系约束.

Petri网起源于20世纪60年代,是一种功能强大且应用广泛的数形结合工具,广泛应用于流程优化.文献[14]首次提出利用Petri网描述航班保障流程,仅覆盖部分保障节点,未能刻画流程的层级结构与复杂行为.文献[15]为了实现机场协同运行,提出基于Petri网的地面保障过程态势感知方法,但其模型侧重于态势识别,缺乏对保障节点间复杂关系的细致建模.着色Petri网在传统Petri网的基础上引入数据结构,使得标识能够携带信息颜色,从而增强建模能力,因此广泛应用于车地通信系统[16]、列控

系统[17].文献[18]通过着色时间Petri网描述保障作业及其逻辑关系,提出了新的保障服务时间估算的区间估计法,但仅聚焦于保障节点作业时间的建模,忽略了节点间的衔接时间.一些研究利用Petri网分析地面保障资源问题.文献[19]利用Petri网对航班地面保障过程中的资源进行建模,旨在通过对资源流动和状态变化的深入分析,优化资源配置和任务执行效率,但未分析网络的稳态行为,如库所繁忙率、变迁利用率等,从而无法系统评估资源配置策略的高效性.部分学者将Petri网与预测模型结合,用于特征提取与节点预测.文献[20]提出了一种基于Petri网与CNN-LSTM-ATT融合预测模型的航班延误预测方法,通过构建离港航班地面保障Petri网模型,提取关键作业时长作为动态特征.文献[21]提出了一种基于时间变迁Petri网的描述模型,并根据该模型设计了基于贝叶斯定理的周转时间动态预测方法.上述研究虽然利用Petri网结构刻画了保障流程并提取了部分时间特征,但均未进一步开展网络性能分析并纳入预测输入中,从而影响模型对流程动态性的刻画精度与预测效果.

综上所述,现有研究在保障流程建模中虽呈现出方法多样化趋势,从关键路径法、网络拓扑建模到仿真模拟与Petri网方法均有涉及,但普遍存在流程刻画不完整、流程结构简化、随机性体现不足等问题.尤其在基于Petri网的研究中,尚未发挥Petri网在表达节点复杂串并联关系、层级性与随机性方面的建模优势.尽管部分工作已结合预测模型提取流程特征,但大多停留在结构建模与静态特征提取层面,缺乏对流程网络性能的深入分析与利用.针对上述不足,本文采用随机Petri网刻画航班地面保障流程,将保障节点间的衔接等待时间纳入模型,准确描述节点间复杂的串并联结构与流程的层级特性,并结合马尔科夫链对网络进行性能分析,反映航班地面保障流程的时间随机特性,识别保障流程中的关键保障节点及节点间的衔接.

1　航班地面保障流程Petri网建模

1.1　航班地面保障流程特性分析

地面保障过程可细分为飞机流程、旅客流程、货物流程.各流程内部又包含多个串并行保障节点,各项保障节点间存在一定的先后顺序及衔接时间间隔,共同构成了航班地面保障流程.航班地面保障流程中保障节点的作业效率及节点间的衔接效率将直接影响整个保障流程的时间及航班地面保障准点率.航班地面保障流程中的串并联关系如图1所示[22].

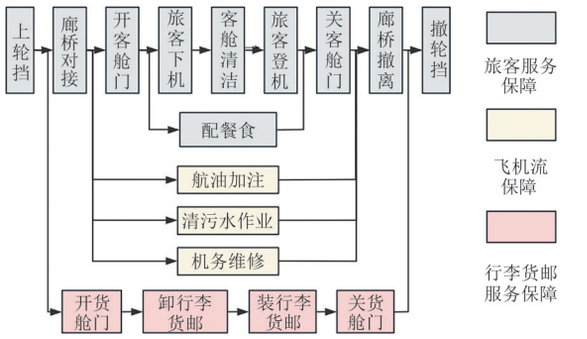


图1　航班地面保障流程图

Fig.1　Flight ground handling process flow

1.2　模型元素说明

随机Petri网(Stochastic Petri Nets, SPN)为Petri网中的每个活动分配服从随机分布的时间,从而模拟系统中事件的时间延迟.航班地面保障过程包含多个地面保障节点,各节点运行主体的多样化(机场、地服、航司、空管等)带来节点持续时间及节点间衔接时间的随机性.

随机Petri网由6种元组描述,航班地面保障SPN的数学表达式为

$$\mathrm{SPN}=\{P,T,F,W,M,\lambda\} \tag{1}$$

式中:$P=\{p_0,p_1,\cdots,p_n\}$为库所集,表示保障节点进行过程或保障节点间的衔接过程前后的准备或完成状态,准备状态指某个节点未开始作业的状态,例如上轮挡准备指机务人员未开始放置轮挡的状态,库所总数为$n+1$;$T=\{t_0,t_1,\cdots,t_m\}$为变迁集,表示当前保障节点的进行过程或保障节点间的衔接过程,假设地面保障流程中保障节点进行过程或节点间的衔接过程持续时间服从指数分布,则变迁t_i的时间属性$\overline{d_i}$为对应事件平均持续时间,变迁总数为$m+1$;库所集和变迁集之间需满足$P\cap T\neq\varnothing, P\cup T\neq\varnothing$;$F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$为连接库所和变迁的有向弧集合;$W$为权重函数,表示触发变迁所需的标记数;$M=\{m_0,m_1,\cdots,m_L\}$为系统当前状态标识集合,表示在依次触发变迁的情况下,令牌从一个库所转移到下一个库所时系统的转移状态,例如在上轮挡正在进行时,航班地面保障流程处于从上轮挡准备向上轮挡完成转移的状态;$\lambda=\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m\}$为各节点变迁的平均发生速率集合.变迁$t_i$平均发生速率$\lambda_i$计算式为

$$\lambda_i=\frac{1}{\overline{d_i}} \tag{2}$$

为刻画保障节点时间随机性,解构节点间复杂的串并联关系,需明确航班地面保障SPN的元素解释及符号释义,如表1所示.

表 1 航班地面保障SPN元素含义及符号释义

Tab.1 Definitions and symbols of SPN elements in the flight ground handling process

元素	意义	符号	作用
库所	事件发生状态	●	表示保障节点或节点间的衔接准备或完成状态
变迁	事件进行过程	■	其时间属性表示保障节点平均持续时间或节点间平均衔接时间
弧	连接变迁与库所	→	表示状态与保障节点或节点间衔接进行过程之间的关系
令牌	系统状态的标记	·	表示资源数,从一个库所流向另一个库所

1.3 模型规则表示

1.3.1 保障节点间的衔接变迁刻画

对航班地面保障实际运行过程分析,保障节点间通常存在衔接时间.既有研究仅关注保障节点,文献[4]用AOE网络刻画保障节点,文献[6-7]利用简单时间网络STN模型刻画保障节点间的时间关系,都忽略了节点间的衔接效率.因此添加变迁表示保障节点间的衔接,从而更精确反映地面保障运行特性.例如,理论上客舱清洁应在旅客下机完毕后立即进行,但实际运行过程中,客舱清洁开始与旅客下机完成存在一定的时间间隔.航班地面保障流程效率不仅取决于单个节点的高效完成,还取决于不同节点间的前后衔接效率.不同保障节点衔接情形下的变迁刻画如图2所示.

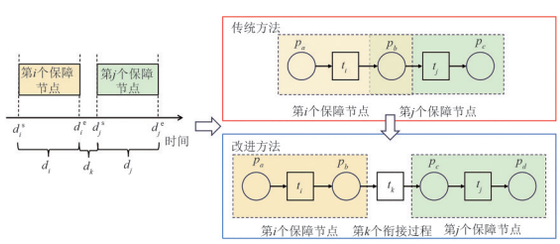


图 2 保障节点间的衔接变迁刻画

Fig.2 Transition characterization of connections between handling nodes task connection transitions

第i个保障节点进行过程持续时间d_i计算式为

$$d_i = d_i^{\mathrm{e}} - d_i^{\mathrm{s}} \tag{3}$$

第i个保障节点与第j个保障节点间的第k个衔接过程持续时间d_k计算式为

$$d_k = d_j^{\mathrm{s}} - d_i^{\mathrm{e}} \tag{4}$$

式中:d_i^{s}、d_i^{e}为第i个保障节点的开始与结束时间;d_j^{s}、d_j^{e}为第j个保障节点的开始与结束时间.

1.3.2 航班地面保障流程层级结构刻画

在航班地面保障流程中,旅客下机、客舱清洁、旅客登机3个保障节点与餐食及机供品配供形成并行结构,该并行结构又与开客舱门、关客舱门保障节点形成串联结构,最后与航油加注保障节点构成并行关系;只有当并行结构内的所有保障节点均完成后,后续串行保障节点的任务才能启动;保障节点间复杂的串并联关系使得航班地面保障流程呈现显著的层级特性.如果直接采用SPN对整个流程建模,后续网络性能分析将会十分困难,因此本文采用层次化建模方法,构建多层级航班地面保障SPN模型.航班地面保障流程层级结构刻画示意图如图3所示.

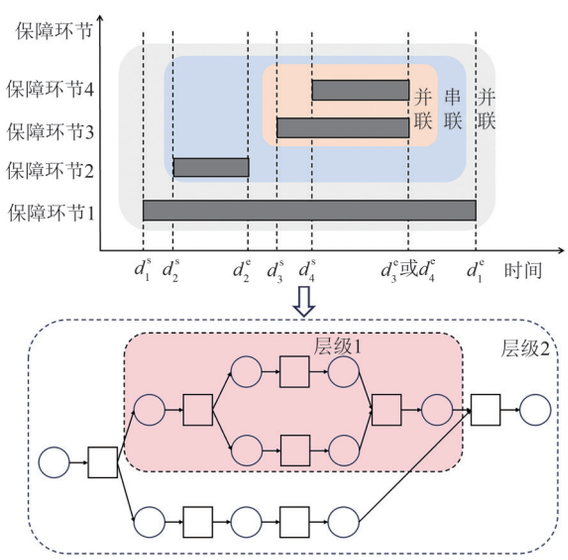


图 3 航班地面保障流程层级结构描述

Fig.3 Hierarchical structure description of flight ground handling process

1.4 模型有效性验证

需要对建立的航班地面保障流程SPN模型进行模型有效性验证,判断网络是否具有活性和有界性.采用关联矩阵与不变量法对SPN模型的有效性进行分析,通过求解不变量来判断SPN模型的活性和有界性证明模型的有效性.共有4个步骤.

步骤1:建立关联矩阵.根据建立的SPN模型得到输入矩阵$\boldsymbol{C}^{-}(p_i,t_j)$和输出矩阵$\boldsymbol{C}^{+}(t_i,p_j)$.矩阵表示为

$$\boldsymbol{C}^{-}(p_i,t_j)=\begin{bmatrix} c_{1,1}^{-} & c_{1,2}^{-} & \cdots & c_{1,m}^{-} \\ c_{2,1}^{-} & c_{2,2}^{-} & \cdots & c_{2,m}^{-} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n,1}^{-} & c_{n,2}^{-} & \cdots & c_{n,m}^{-} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{C}^{+}(p_i,t_j)=\begin{bmatrix} c_{1,1}^{+} & c_{1,2}^{+} & \cdots & c_{1,m}^{+} \\ c_{2,1}^{+} & c_{2,2}^{+} & \cdots & c_{2,m}^{+} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n,1}^{+} & c_{n,2}^{+} & \cdots & c_{n,m}^{+} \end{bmatrix} \tag{6}$$

输入矩阵$\boldsymbol{C}^{-}(p_i,t_j)$为变迁触发时,从库所中消耗的令牌数量,输出矩阵$\boldsymbol{C}^{+}(p_i,t_j)$为变迁触发后,在库所中生成的令牌数量.由于航班地面保障流程中仅有1个令牌,因此数值为1或0,其取值要求为

$$c_{ij}^{-}=\begin{cases}1 & p_{i-1}是t_{j-1}的输入库所\\ 0 & p_{i-1}不是t_{j-1}的输入库所\end{cases} \tag{7}$$

$$c_{ij}^{+}=\begin{cases}1 & t_{j-1}是p_{i-1}的输入变迁\\ 0 & t_{j-1}不是p_{i-1}的输入变迁\end{cases} \tag{8}$$

由此得到关联矩阵

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{C}^{+}(p_i,t_j)-\boldsymbol{C}^{-}(p_i,t_j) \tag{9}$$

步骤2:计算库所不变量.库所不变量是一个列向量$\boldsymbol{X}=\{X_1,X_2,\cdots,X_Z\}$,满足线性方程

$$\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}=0 \tag{10}$$

步骤3:分析库所不变量结果.检查根据方程的解得到的列向量$\boldsymbol{X}$中是否存在非负数解.如果存在非负数解说明建立的SPN模型是有界的.如果无解或全为负数解说明SPN模型无效.

步骤4:计算库所不变量函数.已知共有z个库所不变量,则库所不变量函数为

$$P(\boldsymbol{X})=\sum_{z=1}^{Z}k_z\boldsymbol{X}_z \tag{11}$$

式中:k_z的取值为0或1.通过对库所不变量中负数解的系数$k=\{k_1,k_2,\cdots,k_Z\}$进行赋值,得到不存在负数的库所不变量函数$P(\boldsymbol{X})$集合.如果库所不变量函数$P(\boldsymbol{X})$集合均覆盖了所有变迁,说明SPN模型中不存在未被触发的变迁,证明此模型具有活性.

2　模型性能分析方法

2.1　随机Petri网时间性能等价化简方法

由于多层级航班地面保障SPN模型主要由串联与并联结构嵌套构成,其可达状态空间呈指数级增长,带来了较高的建模与求解复杂度,因此,在逐层分析航班地面保障SPN模型时,根据时间性能等价化简方法[23-24],将该层级中的串并联结构通过简化后可等效为一个复合变迁,作为下一层级建模的元素,以降低求解难度.

对于航班地面保障流程中的串联结构,如"旅客下机、客舱清洁、旅客登机"等保障节点,通常按严格的先后顺序依次执行.针对这类具有明确先后顺序的任务序列,可在其对应的随机Petri网模型中,采用时间性能等价化简方法,将原有的串联变迁结构等效为一个复合变迁,从而降低模型的状态空间复杂度.串联结构时间性能等价化简方法如图4所示.

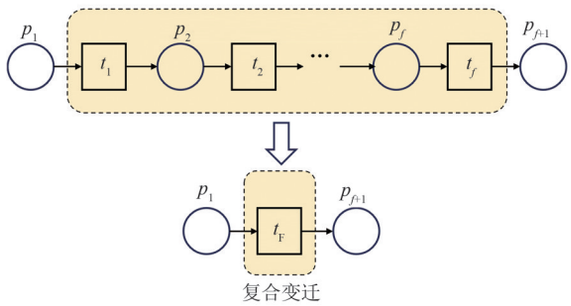


图4　串联结构时间性能等价化简

Fig.4　Time-performance equivalence simplification of serial structures

由f个变迁$t=\{t_1,t_2,\cdots,t_f\}$组成的串联结构中,变迁t_i平均发生速率为λ_i,与串联结构化简得到的复合变迁t_F的平均发生速率λ_F间关系为

$$\frac{1}{\lambda_F}=\sum_{i=1}^{f}\frac{1}{\lambda_i} \tag{12}$$

对于航班地面保障流程中的并联结构,如"旅客下机、客舱清洁、旅客登机"3个串联保障节点与"餐食及机供品配供"形成并行结构.首先,可通过串联结构的时间性能等价化简方法,将"旅客下机、客舱清洁、旅客登机"3个保障节点简化为一个复合变迁.随后,由于各并行保障任务之间相互独立、可同步执行,可进一步将整个并联结构在随机Petri网中等效为一个复合变迁,以降低模型的状态空间复杂度.并联结构时间性能等价化简方法如图5所示.

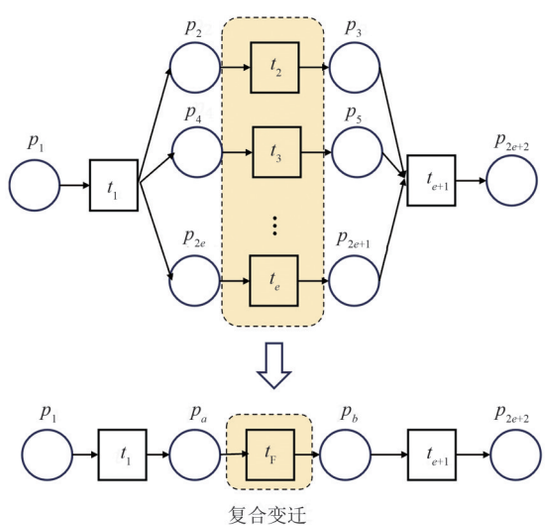


图5　并联结构时间性能等价化简

Fig.5　Time-performance equivalence simplification of parallel structures

由e个变迁$t=\{t_2,t_3\cdots,t_e\}$组成的并联结构中,变迁t_i平均发生速率为λ_i,与串联结构化简得到的复合变迁t_F的平均发生速率λ_F间关系为

$$\frac{1}{\lambda_{\mathrm{F}}}=\sum_{i=1}^{e}\frac{1}{\lambda_i}-\sum_{i=1}^{e-1}\sum_{j=i+1}^{e}\frac{1}{\lambda_i+\lambda_j}+\sum_{i=1}^{e-2}\sum_{j=i+1}^{e-1}\sum_{k=j+1}^{e}\frac{1}{\lambda_i+\lambda_j+\lambda_k}+\cdots+(-1)^{e-1}\frac{1}{\sum_{i=1}^{e}\lambda_i} \tag{13}$$

2.2 SPN性能分析理论

SPN性能分析采用对同构的马尔科夫链(Markov Chain,MC)转移矩阵进行求解分析.共有5个步骤.

步骤1:确定状态空间.确定航班地面保障SPN模型运行时所有可能的系统状态,得到状态标识集合$M=\{m_0,m_1,\cdots,m_L\}$.

步骤2:确定状态转移规则.分析变迁的触发条件和触发后SPN模型的状态变化.如m_l与m_g分别为变迁t_i触发前和触发后系统的两个状态,则状态m_l到状态m_g的转移概率q_{lg}为变迁t_i的平均发生速率λ_i.

步骤3:根据状态转移规则构造马尔科夫链.在MC中,节点表示可达的标识,节点之间通过同构的有向弧连接,弧上的数值则为两个相邻状态之间的转移概率.

步骤4:构建状态转移方程组.基于构造的MC,求解状态稳定概率,即

$$\begin{cases}Y\boldsymbol{Q}=0\\ \sum_{l=0}^{L}y_l=1\end{cases} \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$表示该SPN模型状态m_l到状态m_g的转移概率矩阵;$Y=\{y_0,y_1,\cdots,y_L\}$的值表示状态标识集合$M=\{m_0,m_1,\cdots,m_L\}$的稳定概率$G[m_l]$.

步骤5:计算性能指标,共有5个性能指标.

指标1:库所繁忙率,表示该库所在整体流程中的占用程度,用于衡量保障节点进行过程或节点间的衔接是否长时间处于前续准备状态或后续完成状态,计算式为

$$G\left[m(p_i)=i\right]=\sum_{l}G[m_l] \tag{15}$$

式中:m_l为库所p_i中含有托肯的状态标识.

指标2:库所平均标记数,用于衡量该系统库所平均占用程度,表示航班地面保障流程运行期间,该库所中令牌数量的期望值,计算式为

$$\overline{u_i}=\sum_{j}j\times G\left[m(p_i)=j\right] \tag{16}$$

由于航班地面保障流程的库所中仅有一个令牌,因此$j=1$,则得到

$$\overline{u_i}=G\left[m(p_i)=1\right] \tag{17}$$

则保障流程中所有库所标记数的平均值为

$$\bar{N}=\sum_{i=0}^{n}\overline{u_i}=\sum_{i=1}^{n}G\left[m(p_i)=1\right] \tag{18}$$

指标3:变迁利用率,表示该变迁在整体流程中被触发的频繁程度,用于衡量保障节点或衔接过程在整体保障流程中被执行的时间占比,计算式为

$$u(t_i)=\sum_{M\in E}G[m_l] \tag{19}$$

式中:E为触发变迁t_i的标识集合.

指标4:变迁标记流速,用于衡量该变迁触发时系统中标记的流动频率,表示变迁在单位时间内消耗或产生标记的速率,计算式为

$$R(t_i,p_j)=W(t_i,p_j)\times u(t_i)\times\lambda_i \tag{20}$$

式中:$W(t_i,p_j)$为变迁t_i指向库所p_j的有向弧上的权值,建立的航班地面保障SPN模型有向弧权重均为1.

指标5:系统平均持续时间,根据Little平衡原理及排队论相关理论,航班地面保障流程整体平均持续时间H可表示为

$$H=\frac{\bar{N}}{R(t,p)} \tag{21}$$

2.3 性能分析方法

基于时间性能等价化简规则,提出一种针对多层级航班地面保障随机Petri网性能分析的方法,具体流程如图6所示,共有3个步骤.

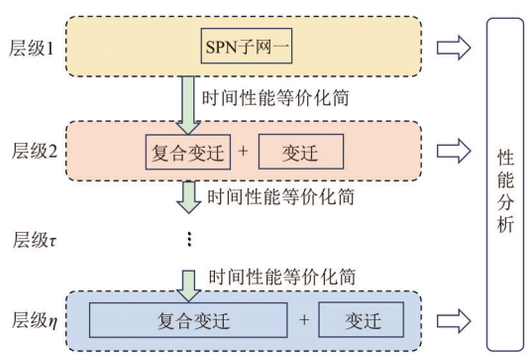


图6 多层级航班地面保障SPN模型性能分析方法

Fig.6 Performance analysis method for multi-level flight ground handling process SPN model

步骤1:对层级1的SPN进行性能分析,采用时间性能等价化简方法进行化简,得到复合变迁.

步骤2:将前1层级得到的复合变迁与其他变迁共同构成层级2的SPN,继续进行性能分析,并再次应用时间性能等价化简方法,生成新的复合变迁.

步骤3:重复上述过程,逐层化简,直至最终层

级,完成整体航班地面保障流程SPN性能分析.

2.4　性能指标结果分析方法

2.4.1　平均发生速率动态变化影响分析

由性能指标计算式可知,航班地面保障流程整体持续时间与各变迁平均发生速率呈负相关,当变迁平均发生速率增加,航班地面保障流程整体持续时间降低,航班地面保障流程整体持续时间与可达标志状态的稳态概率之间的关系可抽象为

$$H=\frac{\bar{N}}{R(t,p)}=\frac{\sum_{i=1}^{n}G\left[m(p_i)=1\right]}{W(t_i,p_j)\times u(t_i)\times\lambda_i}=\frac{1}{\mu_i}\times\frac{1}{G[m_l]}+\delta_i \tag{22}$$

式中:μ_i、δ_i为固定值;μ_i表示变迁t_i的执行速率,取值为单位时间内变迁对应的保障节点可执行的次数,来源于实际运行数据,当研究对象已限定为同类型航班,保障能力较为稳定,因此在统计意义下μ_i可视为固定值;δ_i用于修正因模型简化或流程内非线性关系带来的残差偏差,可通过回归拟合方式估计,尽管在实际系统中可能存在微小变化,但在单位时间尺度和大样本统计意义下,其变化幅度相对较小,且对系统运行时间的影响为次要,因此可将其近似为固定值.

稳态概率的变化会导致整体持续时间发生改变.因此可以通过对比分析当变迁发生速率动态变化时,各稳态概率的变化程度,以此识别对整个流程持续时间影响相对较大的关键保障节点及衔接.分析步骤共3步.

步骤1:假设变迁t_i的时间属性平均持续时间$\overline{d_i}$在一个范围内:$\overline{d_i}\in\left[d_i^{\min},d_i^{\max}\right]$,得到该变迁对应的平均发生速率$\lambda_i=\left\{\lambda_{i1},\lambda_{i2},\cdots,\lambda_{ij}\right\}$.

步骤2:由于建立了多层级航班地面保障SPN模型,最终层级η涵盖了所有变迁,因此直接分析层级η的稳态概率.但层级η中存在由前续层级变迁t_k通过时间性能等价化简而来的复合变迁t_{F},前续层级内的基本变迁的发生速率变化最终都会导致复合变迁变化发生速率变化,函数关系简化表达为

$$\lambda_{\mathrm{F}}=f(\lambda_k) \tag{23}$$

根据性能指标公式计算变迁集T内所有变迁在发生速率$\lambda_i=\left\{\lambda_{i1},\lambda_{i2},\cdots,\lambda_{ij}\right\}$下各标识稳态概率,$T=\left\{t_0,t_1,\cdots,t_m\right\}$.对于组成复合变迁$t_{\mathrm{F}}$的层级1至层级$\eta-1$内变迁$t_k$,其稳态概率为$\left(G[m_l]\right)_{f(\lambda_k)}$;对于层级$\eta$内的基本变迁$t_i$,其稳态概率为$\left(G[m_l]\right)_{\lambda_i}$.

步骤3:分析稳态概率的累计变化量.对于层级1至层级$\eta-1$的变迁t_k,其稳态概率累计变化量计算式为

$$v_k=\sum_{l=0}^{L}\left[\left|\mathrm{Max}\left(G[m_l]\right)_{f(\lambda_k)}-\mathrm{Min}\left(G[m_l]\right)_{f(\lambda_k)}\right|\right] \tag{24}$$

对于层级η内的基本变迁t_i,其稳态概率累计变化量计算式为

$$v_i=\sum_{l=0}^{L}\left[\left|\mathrm{Max}\left(G[m_l]\right)_{\lambda_i}-\mathrm{Min}\left(G[m_l]\right)_{\lambda_i}\right|\right] \tag{25}$$

式中:$\mathrm{Max}\left(G[m_l]\right)_{f(\lambda_k)}$、$\mathrm{Max}\left(G[m_l]\right)_{\lambda_i}$分别表示变迁发生速率$\lambda_k$、$\lambda_i$变化区间内状态概率的最大值;$\mathrm{Min}\left(G[m_l]\right)_{f(\lambda_k)}$、$\mathrm{Min}\left(G[m_l]\right)_{\lambda_i}$分别表示变迁发生速率$\lambda_k$、$\lambda_i$变化区间内状态概率的最小值.

2.4.2　地面保障流程运行效率分析方法

各变迁发生速率的提升会直接影响流程的运行效率[25].已知不同变迁发生速率对平均运行时间的影响程度并不相同,关键保障节点及衔接对平均持续时间的影响较为显著,而其他环节的影响相对较弱.基于识别的关键保障节点及衔接,为缩短保障流程的平均持续时间,提高运行效率,分析当关键保障节点及衔接对应变迁发生速率变化时,地面保障整体流程平均持续时间变化趋势,同样,假设变迁t_i的时间属性平均持续时间$\overline{d_i}$在范围内:$\overline{d_i}\in\left[d_i^{\min},d_i^{\max}\right]$,得到该变迁对应的平均实施速率$\lambda_i=\left\{\lambda_{i1},\lambda_{i2},\cdots,\lambda_{ij}\right\}$,根据性能分析方法计算层级$\eta$对应的系统平均持续时间$H=\left\{H_1,H_2,\cdots,H_j\right\}$.

3　实例仿真分析

3.1　模型构建

研究数据来源于中国某大型航空枢纽2023年3月至2024年3月国内过站航班数据,涵盖了进离港航班号、航空公司、机位等基础属性信息及各个保障节点时间.由于近机位航班占比高达99.1%,C类机型占比80.2%,且国内航线占74.4%,为控制异质性干扰并提升数据的代表性与一致性,本文将研究对象限定为近机位的C类国内过站航班地面保障流程.

航班地面保障运行数据较多,原始数据中部分保障节点未被记录,主要原因为部分节点由人工操作未实现系统化记录,如清洁人员到位时间、装卸人员到位时间等,因此将其剔除.最终保留了能够覆盖典型过站航班中主要操作环节的11个保障节点,满足多层级航班地面保障流程SPN建模与性能分析的需求.

在数据清洗阶段，剔除了3类异常数据.

第1类：缺失值与重复记录.删除存在字段缺失或信息重复的数据样本，确保数据完整性和唯一性.

第2类：流程逻辑异常.删除不符合正常地面保障流程逻辑的航班数据，例如某些保障节点完成时间早于上轮挡时间，违反地面保障基本时序要求.

第3类：根据C类机型在近机位的常规保障要求，最小过站时间一般为40～60 min.结合实际运行数据及专家经验，设定当航班过站时间超过240 min（即正常流程4倍）时，视为严重延误，剔除该类数据以排除异常扰动.

数据清洗处理后，最终筛选出了7 149个航班样本.

多数研究将航班地面保障流程视为固定不变的标准流程[18-19]，忽略实际运行中节点时序的动态差异，如餐食供应与客舱清洁的并行关系可能因餐车到位时间不同而改变.这种简化会掩盖真实流程的多样性，降低模型有效性.因此，基于面向数据驱动的航班样本筛选机制，根据典型保障节点的相对时序关系，将航班划分为不同结构类型，如表2所示.

表2 基于保障节点相对时序关系的航班保障流程结构分类

Tab.2 Classification of flight ground handling process structures based on relative task timing

保障节点对比关系	顺序关系	航班样本数量/个	占比/%
餐车就位时间、客舱门开启时间	餐车就位时间早于客舱门开启时间	121	1.7
	餐车就位时间晚于客舱门开启时间	7 028	98.3
航油车就位时间、廊桥对接完成时间	航油车就位时间早于廊桥对接完成时间	328	4.6
	航油车就位时间晚于廊桥对接完成时间	6 821	95.4
航油加注完成时间、廊桥撤离完成时间	航油加注完成时间早于廊桥撤离完成时间	254	3.6
	航油加注完成时间晚于廊桥撤离完成时间	6 895	96.4

由表2可知，取餐车就位时间晚于客舱门开启时间、航油车就位时间晚于廊桥对接完成时间及航油加注完成时间晚于廊桥撤离完成时间的航班样本占比最多，因此选取样本量充足的主流结构类型作为建模基础，最终得到共6 694个航班的11个保障节点进行SPN构建.

基于航班地面保障流程结构和SPN的相关概念，建立了航班地面保障流程SPN模型，并且根据保障节点间的串并联关系划分了层级结构，共3个层级，如图7所示.

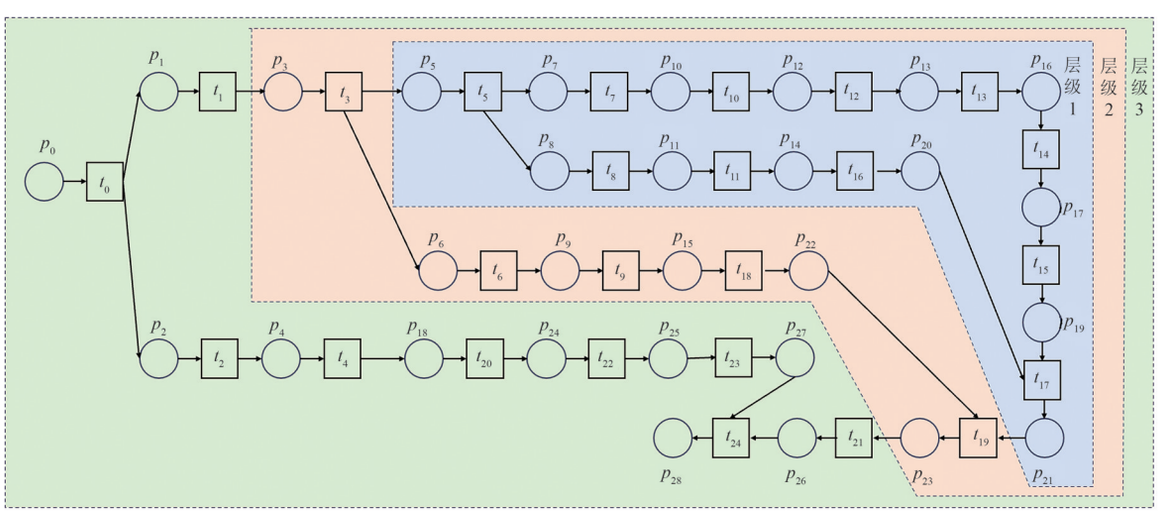


图7 多层级航班地面保障流程SPN模型

Fig.7 SPN model of the multi-level flight ground handling process

由图7可知：层级1主要涉及旅客服务保障，层级2在层级1的基础上进一步涵盖飞机流保障，层级3则在层级2的基础上增加了行李、货邮服务保障，描述了整个地面保障流程；共有29个库所，25个变迁，涉及11个保障节点，14个保障节点间衔接等待过程；模型中所有连接变迁和库所的有向弧权重均为1，库所p_0中有1个令牌，其他库所中的令牌数为0，模型由p_0开始运行，表示航空器滑入近机位后准备进行上轮挡作业，当上轮挡作业事件发生时，变迁t_0被触发，随着保障进程的不断推进，后续变迁按照SPN模型依次触发，直至变迁t_{24}触发完成，令牌传递至最后1个库所，表示航空器撤轮挡作业完成，准备推离机位.航班地面保障流程的SPN模型中库所及变迁的含义如表3、表4所示.

表3　多层级航班地面保障流程的SPN模型库所含义

Tab.3　Definitions of places in the SPN model for the multi-level flight ground handling process

库所	语义描述	库所	语义描述
p_0	准备上轮挡作业	p_{15}	航油加注完成
p_1	上轮挡作业完成,机务准备给出廊桥对接指令	p_{16}	准备旅客登机
p_2	上轮挡作业完成,机务准备给出开启货舱门指令	p_{17}	旅客登机完成
p_3	准备廊桥对接	p_{18}	货邮行李卸载完成
p_4	准备开启货舱门	p_{19}	旅客登机完成后,客舱门关闭完成
p_5	廊桥对接完成,确认进行客舱门开启操作	p_{20}	餐食及机供品配供完成后,客舱门关闭完成
p_6	廊桥对接完成,确认进行航油加注	p_{21}	客舱门关闭完成后,准备撤廊桥作业
p_7	准备开启客舱门	p_{22}	航油加注完成后,准备撤廊桥作业
p_8	准备进行餐食及机供品配供	p_{23}	廊桥撤离完成
p_9	航油车就位完成	p_{24}	准备装载行李货邮
p_{10}	旅客下机完成	p_{25}	货舱门关闭完成
p_{11}	配餐车就位完成	p_{26}	廊桥撤离完成后,准备撤轮挡作业
p_{12}	准备客舱清洁	p_{27}	货舱门关闭完成后,准备撤轮挡作业
p_{13}	客舱清洁完成	p_{28}	撤轮挡作业完成
p_{14}	餐食及机供品配供完成	—	—

表4　多层级航班地面保障流程的SPN模型变迁含义

Tab.4　Definitions of transitions in the SPN model for the multi-level flight ground handling process

变迁类型	变迁	语义描述	发生速率
保障节点进行过程	t_0	上轮挡作业过程	λ_0
	t_3	廊桥对接过程	λ_3
	t_4	货舱门开启至行李货邮卸载完成过程*	λ_4
	t_7	开启客舱门至旅客下机完成过程*	λ_7
	t_9	航油加注过程	λ_9
	t_{11}	餐食及机供品配供过程	λ_{11}
	t_{12}	客舱清洁过程	λ_{12}
	t_{14}	旅客登机过程	λ_{14}
	t_{19}	廊桥撤离过程	λ_{19}
	t_{22}	行李货邮开始装载至货舱门关闭完成过程*	λ_{22}
	t_{24}	撤轮挡作业过程	λ_{24}
不同保障节点间衔接过程	t_1	机务给出廊桥对接指令,等待廊桥对接操作过程	λ_1
	t_2	机务给出开启货舱门指令,等待货舱门开启操作过程	λ_2
	t_5	确认进行客舱门开启操作后,等待客舱门开启过程	λ_5
	t_6	确认进行航油加注后,等待航油车就位过程	λ_6
	t_8	确认进行餐食及机供品配供后,等待配餐车就位过程	λ_8
	t_{10}	旅客下机完成后,等待客舱清洁过程	λ_{10}
	t_{13}	客舱清洁完成后,等待旅客登机过程	λ_{13}
	t_{15}	旅客登机后,等待客舱门关闭过程	λ_{15}
	t_{16}	餐食及机供品配供完成后,等待客舱门关闭过程	λ_{16}
	t_{17}	客舱门关闭后,等待廊桥撤离过程	λ_{17}
	t_{18}	航油加注完成后,等待撤廊桥过程	λ_{18}
	t_{20}	货邮行李卸载完成后,等待行李货邮装载过程	λ_{20}
	t_{21}	廊桥撤离完成后,等待撤轮挡过程	λ_{21}
	t_{23}	货舱门关闭后,等待撤轮挡过程	λ_{22}

注:*表示当某个节点持续时间少于1 min时,如客、货舱门开启和关闭节点,将其与邻近节点合并为1个节点.

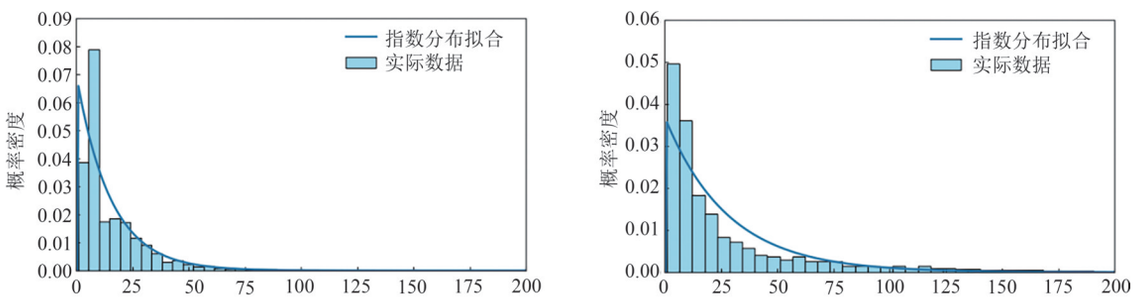
根据模型有效性验证步骤,对建立的航班地面保障SPN模型进行分析,得到库所不变量$\boldsymbol{X}$的基础解系为$\boldsymbol{X}_1=\{0,0,0,0,0,0,0,0,-1,1,0,-1,1,-1,-1,1,0,-1,-1,0,-1,1,0,0,0,0,0,0,0,0\}^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{X}_2=\{0,0,0,0,0,-1,1,-1,0,1,-1,0,-1,-1,0,1,-1,-1,0,-1,0,-1,1,0,0,0,0,0,0\}^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{X}_3=\{0,$

$-1,1,-1,1,-1,0,-1,0,0,-1,0,-1,-1,0,0,-1,-1,1,-1,0,-1,0,-1,1,1,-1,1,0\}^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{X}_4=\{1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1,1,0,0,1,1,0,10,1,0,10,0,1,0,1\}^{\mathrm{T}}$

基础解系$\boldsymbol{X}_4$中的所有向量均为非负数，证明建立的航班地面保障SPN模型是有界的．通过对库所不变量中负数解的系数$k=\{k_1,k_2,\cdots,k_Z\}$进行赋值，得到不存在负数的库所不变量函数$P(\boldsymbol{X})$集合，集合中所有库所均被覆盖，不存在未被涉及库所及变迁，证明建立的航班地面保障SPN模型具有活性．

3.2 模型性能分析

保障节点执行过程t_7及节点间衔接等待过程t_6的持续时间的经验概率密度直方图与指数分布拟合曲线对比结果如图8所示．



（a）保障节点t_7　（b）节点间的衔接t_6

图8 保障节点t_7与节点间的衔接t_6分布拟合对比

Fig.8 Comparison of ground handling tasks t_7 and connection of tasks t_6 fitting

由图8可知：实际数据呈现明显的右偏分布特性，约85%的保障节点作业时间及衔接等待时间集中在0～50 min；随着时间增长，概率密度迅速下降，整体形态与指数分布较为一致，虽然在长尾部分（大于150 min）存在一定波动性，主要由设备故障、恶劣天气等极端情况引起的非正常延误，但总体拟合效果良好．鉴于研究聚焦于常规运行情景下地面保障流程的建模与性能分析，指数分布作为简化近似能有效刻画主要动态特征，具有合理性，且其他变迁数据呈现与上述相同的分布模式，因此支持建立同构马尔科夫链进行性能分析．

通过分析航班保障节点的平均作业保障时间得到SPN模型中变迁的平均持续时间$\overline{d_i}$，得到各层级变迁平均发生速率，如表5所示．

基于SPN模型层级1中各变迁的触发条件和触发后SPN模型的状态变化确定转移规则，得到层级1的同构马尔科夫链，如图9所示．

对层级1进行性能分析，得到层级1库所繁忙率及变迁利用率，根据时间性能等价化简方法，以复合变迁t_C替代变迁$t_7,t_8,t_{10},t_{11},t_{12},t_{13},t_{14},t_{15},t_{16}$，得到层级2的SPN模型，构造层级2的同构马尔科夫链，进行性能分析．同理，用复合变迁t_F替代变迁$t_5,t_C,t_6,t_9,t_{17},t_{18}$，得到层级3的SPN模型，进行性能分析．分析流程如图10所示．

根据性能分析流程，最终得到各层级库所繁忙率及变迁利用率，见表6、表7．

由表6可知：层级1中库所p_{14}的繁忙率最高，为0.355，表明配供完成后到客舱门关闭前的衔接等待时间占比最大；层级2中库所p_{22}的繁忙率最高，为0.442，表明航油加注完成与廊桥撤离间存在显著等待；层级3中库所p_{27}的繁忙率最高，为0.496，表面货舱门关闭后还需要长时间等待才能进行撤轮挡作业．

由表7可知：层级1中变迁t_{16}的利用率最高，为0.355，表明餐食及机供品配供完成后客舱门迟迟未关闭；层级2中变迁t_6利用率最高，为0.230，表明航油车就位不够及时，存在显著就绪等待；层级3中变迁t_{20}利用率最高，为0.191，表明行李货邮的卸载与装载之间的衔接不够紧密．

每个保障节点进行过程或节点间的衔接过程对应1个变迁，与该变迁相连的两个库所（输入库所和输出库所）分别表示保障节点进行过程或节点间的衔接过程的前置状态和后置状态，以刻画过程前后的准备与完成情况．以输入库所繁忙率为横坐标，输出库所繁忙率为纵坐标，坐标轴的交叉点选取输入或输出库所繁忙率的均值，由于保障节点间的并行关系，变迁（t_0、t_3、t_5、t_{17}、t_{19}、t_{24}）有多个输入或输出库所，将每个输入输出库所组合的繁忙率作为单独的点进行分析，构建四象限图进行分类，直观展示保障流程低效与高效运行区域．处于A、B区域的变迁对应的保障节点或不同节点间的衔接较C、

表 5　SPN模型各变迁平均发生速率

Tab.5　Average firing rates of transitions in the SPN model

层级	变迁	平均持续时间/min	速率	平均发生速率/(1/min)
1	t_5	2	λ_5	0.500
	t_7	16	λ_7	0.063
	t_8	22	λ_8	0.046
	t_{10}	1	λ_{10}	1.000
	t_{11}	18	λ_{11}	0.056
	t_{12}	12	λ_{12}	0.083
	t_{13}	27	λ_{13}	0.037
	t_{14}	18	λ_{14}	0.056
	t_{15}	4	λ_{15}	0.250
	t_{16}	38	λ_{16}	0.026
	t_{17}	2	λ_{17}	0.500
	t^*	2	λ^*	0.500
2	t_3	2	λ_3	0.500
	t_6	35	λ_6	0.029
	t_C	117	λ_C	0.009
	t_9	15	λ_9	0.067
	t_{18}	31	λ_{18}	0.032
	t_{19}	2	λ_{19}	0.500
	t^*	2	λ^*	0.500
3	t_0	3	λ_0	0.333
	t_1	1	λ_1	1.000
	t_2	1	λ_2	1.000
	t_4	14	λ_4	0.071
	t_F	153	λ_F	0.007
	t_{20}	38	λ_{20}	0.026
	t_{21}	10	λ_{21}	0.100
	t_{22}	28	λ_{22}	0.036
	t_{23}	14	λ_{23}	0.071
	t_{24}	3	λ_{24}	0.333
	t^*	2	λ^*	0.500

注:为保证同构MC是一个循环结构,t^*为各层级开始库所与终止库所间虚构的时间变迁,无实际意义.

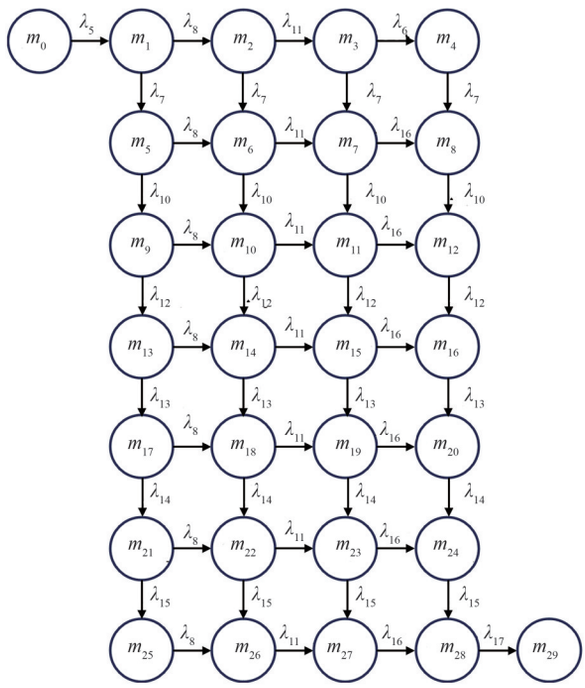


图 9　层级1同构马尔科夫链

Fig.9　Level-1 isomorphic Markov chain

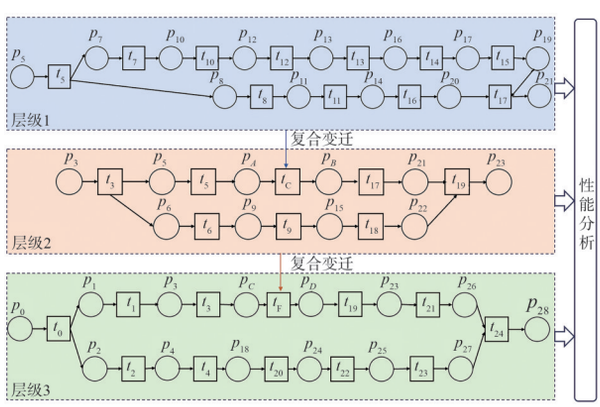


图 10　多层级航班地面保障流程SPN模型性能分析流程

Fig.10　Performance analysis process of the SPN model for multi-level flight ground handling process

D区域输出库所繁忙率高,该区域内变迁对应的保障节点或节点间的衔接长时间处于后置状态.处于A、D区域的变迁对应的保障节点或节点间的衔接较B、C区域输入库所繁忙率高,该区域内变迁对应的保障节点或不同节点间的衔接长时间处于前置状态.用颜色区分变迁所在的层级,保障节点与节点间的衔接输入-输出库所繁忙率四象限图如图11所示.

由图11可知:①A区域(低效运行区)内变迁对应的保障节点(t_{11})长时间处于准备状态,且与后续节点衔接不紧密;变迁对应的节点间的衔接(t_8、t_{13}、t_{16}、t_{18})效率低,后续保障节点任务也迟迟未完成.②B区域(后续低效区)内变迁对应的保障节点(t_3(p_3、p_6)、t_4、t_9、t_{12})与后续节点衔接长时间未完成;变迁对应的保障节点间的衔接(t_5(p_5、p_8)后续保障节点任务迟迟未完成.③C区域(高效运行区)内变迁对应的保障节点(t_0、t_3(p_3、p_5))、t_{19}(p_{21}、p_{23})、t_{24}(p_{26}、p_{28}))与节点间的衔接(t_1、t_2、t_5(p_5、p_7)、t_{10}、t_{21})任务流畅、衔接紧密.④D区域(前续低效区)内变迁对应的保障节点(t_7、t_{14}、t_{19}(p_{22}、p_{23})、t_{22}、t_{24}(p_{26}、p_{28}))长时间处于准备状态,变迁对应的保障节点间的衔接(t_6、t_{17}、t_{20})长时间未完成.

进一步分析变迁利用率结果,将对应变迁利用率及输入库所和输出库所的繁忙率绘制成三维图,变迁利用率决定了气泡的大小,如图12所示.

由图12可知:变迁t_{16}、t_{13}、t_{18}、t_6、t_8、t_{20}、t_{11}、t_{14}、

表6 库所繁忙率

Tab.6 Place occupancy rates

层级	库所	库所繁忙率
1	p_5	0.019
	p_7	0.149
	p_8	0.205
	p_{10}	0.009
	p_{11}	0.168
	p_{12}	0.112
	p_{13}	0.252
	p_{14}	0.355
	p_{16}	0.168
	p_{17}	0.037
	p_{19}	0.235
	p_{20}	0.235
	p_{21}	0.019
2	p_3	0.013
	p_6	0.230
	p_9	0.099
	p_{15}	0.204
	p_{22}	0.442
	p_{23}	0.013
3	p_0	0.015
	p_1	0.005
	p_2	0.005
	p_4	0.071
	p_{18}	0.191
	p_{24}	0.141
	p_{25}	0.071
	p_{26}	0.129
	p_{27}	0.496
	p_{28}	0.010

表7 变迁利用率

Tab.7 Transition utilization rates

层级	变迁	变迁利用率
1	t_5	0.019
	t_7	0.149
	t_8	0.205
	t_{10}	0.009
	t_{11}	0.168
	t_{12}	0.112
	t_{13}	0.252
	t_{14}	0.168
	t_{15}	0.037
	t_{16}	0.355
	t_{17}	0.019
2	t_3	0.013
	t_6	0.230
	t_9	0.099
	t_{18}	0.204
	t_{19}	0.013
3	t_0	0.015
	t_1	0.005
	t_2	0.005
	t_4	0.071
	t_{20}	0.191
	t_{21}	0.050
	t_{22}	0.141
	t_{23}	0.071
	t_{24}	0.015

t_{22}、t_7利用率较高，对应的保障节点进行过程或节点间的衔接过程被频繁触发，耗费大量时间.

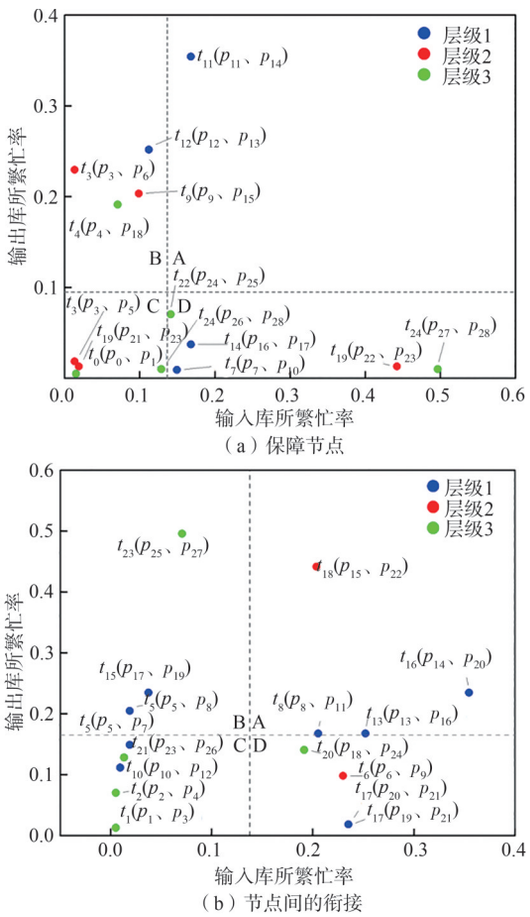
3.3 性能指标结果分析

3.3.1 识别关键保障节点及衔接

根据平均发生速率动态变化影响分析方法可以识别对航班地面保障流程整体持续时间影响相对较大的关键保障节点及衔接.根据6 694个航班的实际运行数据，设置变迁平均持续时间取值范围为[1, 226] min，得到各变迁对应平均发生速率范围为[0.004 43, 1]，由此计算各变迁平均发生速率动态变化下层级3中各稳态概率累计变化量.层级3包含由前续层级基本变迁组合形成的复合变迁，相较于层级3的基本变迁，其稳态概率累计变化值存在较大差异.这是由于性能等价化简过程弱化了前续层级变迁发生速率的动态影响.然而，这些变迁仍对航班地面保障流程的运行效率至关重要，因此需要根据上述对变迁分类再进行对比分析，如表8所示.

由表8可知：前续层级基本变迁t_{16}、t_6、t_{18}、t_{13}、t_8、t_{11}、t_{14}、t_7与层级3中的基本变迁t_{20}、t_{22}发生动态变化时，稳态概率累计变化量较大，表明其对应的保障节点或节点间的衔接过程对航班地面保障流程影响较大.进一步选取稳态概率累计变化量最大的组成复合变迁中的变迁t_{16}和层级3中的基本变迁t_{20}，刻画稳态概率变化趋势，如图13所示.

结合表6的库所繁忙率、表7的变迁利用率及表8的稳态概率累计变化量，按照“高繁忙率、高利用率、高稳态概率变化量”的一致性判据，识别出4个关键保障节点（餐食及机供品配供食、旅客登机、行李货邮装载、旅客下机）与6个关键保障节点间的衔接（餐食及机供品配供完成后等待关客舱门、客舱清洁完成后等待旅客登机、航油加注完成后等待撤廊桥、等待航油车就位、等待配餐车就位、卸载完成后等待行李货邮装载）.其中，餐食及机供品配供完成后等待关客舱门这一衔接过程对应的变迁利



（a）保障节点

（b）节点间的衔接

图 11　保障节点与节点间的衔接输入-输出库所繁忙率四象限图

Fig.11　Four-quadrant diagram of input-output place occupancy rates for ground handling tasks and inter-task connections

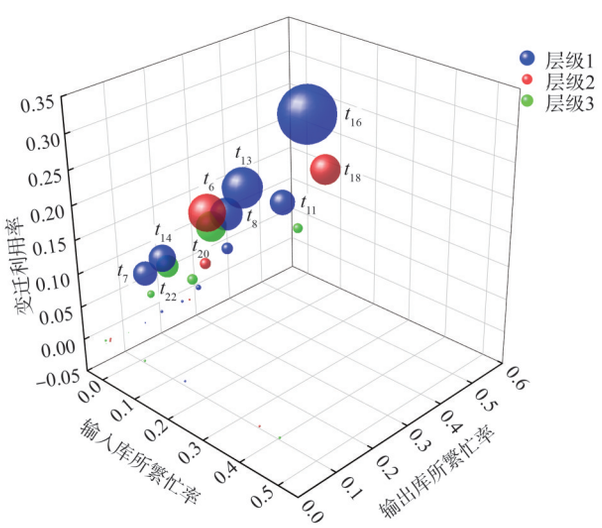


图 12　库所利用率及变迁利用率三维图

Fig.12　3D Chart of place occupancy rate and transition utilization rate

用率最大，为 0.355，其输入库所输出库所繁忙率均较高，分别为 0.355、0.235，其对应层级 3 中的各标识状态稳态概率累计变化量也是组成复合变迁中基本变迁里最大的，为 0.588. 这 10 个关键节点或节点间的衔接长时间处于前续准备或后续完成状态，且保障节点进行过程或节点间的衔接过程耗费时间长，完成或衔接效率低下，其前后准备与完成状态的快速转换对航班地面保障流程的顺利推进起到关键制约作用. 航班地面保障流程的关键部分集中在保障节点间的衔接过程，保障节点自身作业持续时间较短，但长时间处于其前续准备或后续完成状态，与前后续节点间的衔接不紧密，降低了地面保障效率.

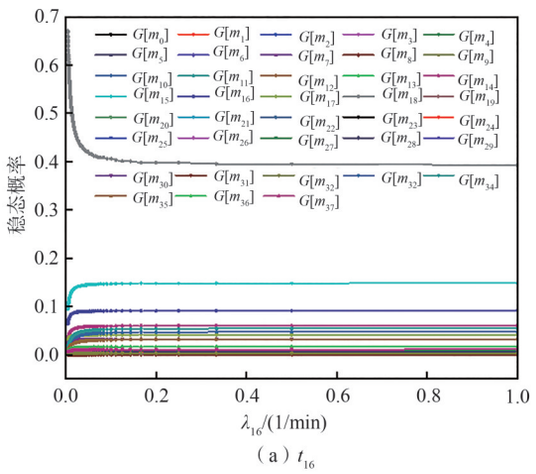
表 8　变迁发生速率动态变化下各标识稳态概率累计变化量

Tab.8　Cumulative changes in the marking probability distribution under dynamic changes in firing rates of transtitions

变迁类型	变迁	稳态概率累计变化量
组成复合变迁	t_5	0.443
	t_6	0.558
	t_7	0.531
	t_8	0.539
	t_9	0.528
	t_{10}	0.508
	t_{11}	0.532
	t_{12}	0.524
	t_{13}	0.541
	t_{14}	0.532
	t_{15}	0.513
	t_{16}	0.588
	t_{17}	0.443
	t_{18}	0.554
层级 3 基本变迁	t_0	1.062
	t_1	0.606
	t_2	0.606
	t_3	1.118
	t_4	1.259
	t_{19}	1.118
	t_{20}	1.417
	t_{21}	1.137
	t_{22}	1.319
	t_{23}	1.259
	t_{24}	1.062

3.3.2　航班地面保障流程运行效率分析

保障节点作业持续时间或节点间的衔接时间缩短会显著提升保障流程的整体进度和效率，根据运行效率分析方法，依次改变关键节点或衔接的变迁 t_6、t_7、t_8、t_{11}、t_{13}、t_{14}、t_{16}、t_{18}、t_{20}、t_{22} 对应的平均发生速率，观测整体流程的平均持续时间变化. 设置变迁的平均持续时间取值范围为[1,226]，仿真当发生



（a）t_{16}

（b）t_{20}

图 13　变迁 t_{16}、t_{20} 动态变化下稳态概率变化趋势

Fig.13　Trend of the marking probability distribution variation under dynamic changes in transition t_{16}、t_{20}

速率变化时，地面保障整体流程平均持续时间变化趋势，并绘制成图，如图 14 所示.

由图 14 可知：随着变迁平均发生速率的不断增大，航班地面保障流程的整体平均持续时间逐渐缩短；当平均发生速率大于 0.2 后，即节点或衔接平均

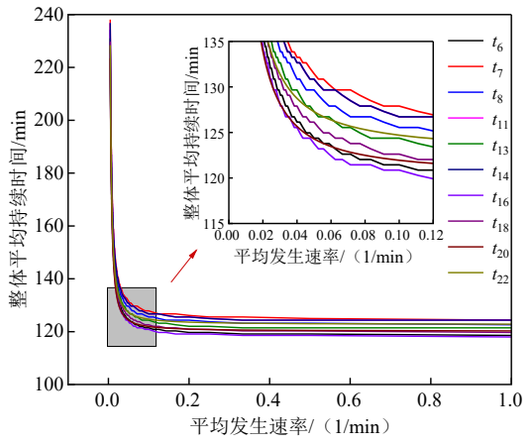


图 14　地面保障流程整体平均持续时间变化

Fig.14　Trend of changes in the average delay for flight ground handling process

持续时间缩短至 5 min 时，保障流程整体平均持续时间的变化趋势开始减弱，说明在此基础上进一步缩减节点或衔接持续时间对航班地面保障的运行效率影响变小；餐食及机供品配供完毕后等待关闭客舱门衔接过程对应变迁平均发生速率变化对整体流程平均持续时间的影响最为显著，其衔接效率的提升可以显著缩短整个保障流程的平均持续时间，从而提高航班的准点率.

3.4　对比分析

为进一步验证所构建模型的有效性，构建了 1 个不考虑保障节点间衔接时间的地面保障流程 SPN 模型，作为对照模型. 对照模型假设各保障节点在完成任务后能够立即触发后续节点的执行，忽略了节点间实际存在的衔接过程. 将对照模型与提出的考虑节点间衔接时间的 SPN 模型在模型结构与性能指标两方面进行了系统对比，结果如表 9 所示.

表 9　模型对比分析

Tab.9　Model comparison analysis

模型	模型结构			性能指标		
	库所数量	变迁数量	关键节点数量	库所繁忙率方差	变迁利用率方差	稳态概率累计变化量方差
不考虑衔接时间 SPN 模型	17	13	4	0.041	0.018	0.124
考虑衔接时间 SPN 模型	29	25	10	0.017	0.009	0.107

由表 9 可知：①考虑衔接时间的 SPN 模型中，库所数量由 17 增加至 29 个，变迁数量由 13 增加至 25 个，关键节点数量由 4 增加至 10 个；模型结构复杂度显著提高，更加细致地刻画了地面保障流程中各保障节点及其衔接关系，能够更真实反映实际运行特性.②考虑衔接时间的 SPN 模型在各项指标上均表现出优越性. 库所繁忙率方差由 0.041 降至 0.017，降低幅度达到 58.5%；变迁利用率方差由 0.018 降至 0.009，降低幅度为 50.0%；稳态概率累计变化量由 0.124 降至 0.107，降低幅度为 13.7%. 表明考虑衔接时间的 SPN 模型在刻画保障流程运行状态时具有更强的集中性与稳定性，有效避免了流程中出现极端繁忙或高瓶颈节点的现象，同时提升了系统在面对变迁速率波动时的动态稳定性与抗干扰

能力.因此本文提出的引入保障节点间衔接时间的SPN模型,不仅在节点复杂串并联结构及多层级特性上刻画更加精细且符合实际,也在运行性能分析方面表现出显著优势.

4　结论

1)将保障节点间的衔接等待时间与相同节点的持续时间同时作为SPN变迁的时间属性有助于更精细化地描述航班地面保障的实际流程,提出的多层级航班地面保障流程SPN模型包含29个库所,25个变迁,更加细致地刻画了地面保障流程中各保障节点及其衔接关系,能够更真实反映实际运行特性.

2)模型性能分析结果表明,航班地面保障的时间消耗主要集中在不同保障节点间的衔接过程.通过输入、输出库所繁忙率四象限图直观识别高效与低效区域,实现保障节点及衔接分类结合变迁平均发生速率动态变化下的稳态概率累计变化量,进一步识别关键保障节点及衔接:包括4个关键保障节点及6个关键节点间的衔接,其中,餐食及机供品配供完成后等待关客舱门衔接过程对应的变迁利用率最大,为0.355,其相应的输入库所和输出库所繁忙率均较高,分别为0.355、0.235.该衔接过程耗费时间最长,前续节点长时间处于完成状态,后续节点保障作业迟迟未展开.

3)关键保障节点及节点间的衔接平均发生速率变化情况下,流程整体平均持续时间的变化趋势表明,当平均发生速率大于0.2时,即节点或衔接平均持续时间缩短至5 min时,整体平均持续时间的变化趋势开始减弱,意味着进一步缩减节点或衔接持续时间对整体保障运行效率的影响趋于稳定.

建立的航班地面保障随机Petri网模型仅针对特定航班,未考虑其他机型在远机位地面保障流程,后续可进一步研究多种机型的航班地面保障流程Petri网构建及性能分析方法.

参考文献(References):

[1] 李彪, 王立文, 邢志伟, 等. 过站航班地面保障流程效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(7): 1543－1549.
LI Biao, WANG Liwen, XING Zhiwei, et al. Effectiveness evaluation of ground support process for transit flight [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(7): 1543－1549. (in Chinese)

[2] BRAAKSMA J P, SHORTREED J H. Improving airport gate usage with critical path[J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1971, 97(2): 187－203.

[3] SHEIBANI K. Scheduling aircraft ground handling operations under uncertainty using critical path analysis and Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Business Strategy and Automation, 2020, 1(1): 37－45.

[4] 李明捷, 姚霖昊. 基于AOE网的过站航班保障进程优化[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 178－186.
LI Mingjie, YAO Linhao. Optimization of transit flight service process based on AOE network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 178－186. (in Chinese)

[5] 张力铭. 基于复杂网络的航班保障进程控制策略研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
ZHANG Liming. Research on flight support process control strategy based on complex networks [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022. (in Chinese)

[6] 陈斌, 刘悦, 杨亚磊. 基于STN的机场航班过站保障时间协同规划建模[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(6): 1196－1207.
CHEN Bin, LIU Yue, YANG Yalei. Airport flight transit support time collaborative planning modeling based on STN[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(6): 1196－1207. (in Chinese)

[7] 潘怡凡. 基于STN的航班机坪地面保障作业优化调度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
PAN Yifan. Research on optimization scheduling of flight apron ground handling operations based on STN [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)

[8] 邢志伟, 刘鹏, 李彪, 等. 多马尔可夫链协同的航班客舱保障过程预测[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(3): 948－955.
XING Zhiwei, LIU Peng, LI Biao, et al. Prediction for flight cabin service process based on synergy of multi-Markov chains [J]. Computer Engineering and Design, 2024, 45(3): 948－955. (in Chinese)

[9] 邢志伟, 刘洪恩, 李彪, 等. 基于时空关联网络的机场机位运行过程建模[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 722－730.
XING Zhiwei, LIU Hongen, LI Biao, et al. Modelling for airport gate operation process based on relational spatio-temporal network [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 722－730. (in Chinese)

[10] BAIK H, TRANI A A. Framework of a time-based simulation model for the analysis of airfield operations [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(10): 397－413.

[11] KIERZKOWSKI A, KISIEL T. A simulation model of aircraft ground handling: Case study of the Wroclaw Airport terminal [C]// Information Systems Architecture

and Technology: Proceedings of 37th International Conference on Information Systems Architecture and Technology (ISAT 2016)-Part III. Karpacz, 2017: 109－125.

[12] 廖丹, 黄宝军. 基于AirTOp机场综合保障能力仿真与评估[J]. 航空计算技术, 2017, 47(1): 77－80.
LIAO Dan, HUANG Baojun. Simulation and evaluation of airport comprehensive support capability based AirTOp [J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(1): 77－80. (in Chinese)

[13] 赵征, 胡莉, 钱媛媛, 等. 基于多Agent的航空器拖曳规则优化配置方法研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 113－125.
ZHAO Zheng, HU Li, QIAN Yuanyuan, et al. Research on optimal allocation method of aircraft towing rules based on multi-agent[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(1): 113－125. (in Chinese)

[14] LIU C Y, QIN Y. Modeling the aircraft ground operation on airport based on timed Petri net[C]//2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 1304－1308.

[15] LUO Q, CHEN Y R, CHEN L Y, et al. Research on situation awareness of airport operation based on Petri nets[J]. IEEE Access, 2019, 7: 25438－25451.

[16] 赵天时. 基于有色Petri网的测试案例生成方法及其在CTCS-3车地通信中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 97－103.
ZHAO Tianshi. Test case generation method based on colored Petri net and its application in OnBoard-Trackside communication of CTCS-3[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 97－103. (in Chinese)

[17] 齐凡瑞, 李强. 列控系统RBC测试序列优化生成方法[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(2): 11－19.
QI Fanrui, LI Qiang. Optimal generation method of RBC test sequence for train control system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(2): 11－19. (in Chinese)

[18] 邢志伟, 魏志强, 罗谦, 等. 基于着色时间Petri网的航班保障服务建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1064－1069.
XING Zhiwei, WEI Zhiqiang, LUO Qian, et al. Flight support service process modeling method based on colored time Petri net[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(5): 1064－1069. (in Chinese)

[19] 朱新平, 唐志星, 夏正洪. 基于Petri网的航班机坪保障指挥调度建模[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(12): 48－52.
ZHU Xinping, TANG Zhixing, XIA Zhenghong. Petri net-based modeling of command and dispatch for flight apron service[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(12): 48－52. (in Chinese)

[20] 吴涔, 叶宁, 王甦, 等. 基于PN和CNN-LSTM-ATT的航班延误预测[J]. 计算机技术与发展, 2023, 33(4): 213－220.
WU Cen, YE Ning, WANG Su, et al. Flight delay prediction based on Petri net and CNN-LSTM-ATT[J]. Computer Technology and Development, 2023, 33(4): 213－220. (in Chinese)

[21] CUI Y Y, MA L Y, DING Q M, et al. Aircraft turnaround time dynamic prediction based on Time Transition Petri Net[J]. PLoS One, 2024, 19(7): e0305237.

[22] 中国民用航空局. 机场协同决策系统技术规范: MH/T 6125—2022[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
Civil Aviation Administration of China. Technical specifications for airport collaborative decision making system: MH/T 6125—2022 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022. (in Chinese)

[23] 林闯. 随机Petri网和系统性能评价[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
LIN Chuang. Evaluation of stochastic Petri net and system performance[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

[24] 翟禹尧, 史贤俊, 吕佳朋, 等. 基于GSPN的导弹多层级测试性需求建模与指标评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 970－979.
ZHAI Yuyao, SHI Xianjun, LYU Jiapeng, et al. Modeling and index evaluation of multi-level testability of missiles based on GSPN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(4): 970－979. (in Chinese)

[25] 邓汉年, 周杰, 杨波, 等. 基于随机Petri网的民机审定试飞实施流程建模与分析[J]. 计算机科学, 2024, 51(增1): 1075－1080.
DENG Hannian, ZHOU Jie, YANG Bo, et al. Modeling and analysis of implementation process for civil aircraft certification test flight based on stochastic Petri net [J]. Computer Science, 2024, 51(S1): 1075－1080. (in Chinese)