

【航空科学与工程研究】

# 基于 Petri 网的机场运管委航班 调时调减工作流程仿真研究

黄涛<sup>1</sup>, 张琳<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 通用航空产业发展研究中心;  
2. 沈阳航空航天大学 民用航空学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:**民航业正处于数字化转型及协同运行机制建设时期,航空运输服务需求显著增加,优化运行工作流程、提高民航运行效率迫在眉睫。对数字化转型背景下民航机场联合运行管理委员会航班调时调减管理工作流程进行了总结,并基于 Petri 网系统的建模理论对工作流程进行仿真建模,通过分析仿真模型的性能,找出运行过程中容易出现瓶颈的环节,为民航抓住数字化转型机遇,优化运行工作流程提供决策依据。

**关键词:**机场运管委;Petri 网;仿真建模

**中图分类号:** F 560      **文献标识码:** A      **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2022.06.002

## 0 引言

机场、空中交通管制系统、航空公司都是航空运输业的重要节点,机场联合协同运行管理委员会(简称运管委)的主要任务是加强三方协同联动,目前国内对民航协同运行机制的研究主要是机场航班延误预警的管理运行流程<sup>[1-2]</sup>。在当前民航数字化转型的阶段,围绕多方协同的运行方式,对运管委的运行管理流程进行研究,给民航数字化转型阶段建设全国民航协同运行机制与管理方案提供了新的思路,为协同运行管理的智能化建设奠定了基础,有助于全行业提升协同决策能力,对民航精细化运行管理及资源的充分利用有重要意义。

## 1 民航运管委协同运行方式

运管委是指中国民航管制区域内航空公司及各机场业务运营相关单位间以实现信息共享、协同决策为目标,自愿组建形成的一种基于沟通协调的综合管理的平台。运管委的工作内容覆盖航空器全生命周期的保障流程、旅客安检与登机查验环节、行李分类装载处置和运输环节及雷雨、冰雪等不利天气下航班运行保障流程四大类运行领域,大到组织管理,小到操作细节。

不同地区机场的运管委组织结构不尽相同,但均以流程管理、资源管控、协同决策、生产组织、检测预警、危机应对六大核心功能为基础,均设置值班主任协调席、航班计划席、资源统筹席、信息发布席以及进程管理席,其中进程管理席包含空管、航司、地面 3 个协调席位,负责不同方面的综合协调工作。

收稿日期:2022-07-06

基金项目:辽宁省哲学社会科学基金项目(L21BJY038)

第一作者简介:黄涛(1964—),男,黑龙江嫩江人,教授,博士,主要从事交通运输规划与管理、通用航空产业发展研究。E-mail:huangtao024@163.com

不利天气条件下,为提升航班运行效率和旅客服务水平,运管委会负责组织协调航班的调时调减工作,部署协调机场保障部门工作,流程如图 1 所示。首先,在航班计划前 7 天到航班起飞前一段时间内,利用气象部门发布的数据了解气象限制情况。其次,由运管委组织空管相关部门、各航空公司及保障单位的有关部门负责人到场,组织召开气象研判及流量限制分析协商会议,由空管部门及航空公司的气象专家对气象预报的数值结果进行分析探讨,最终给出较为精确的影响能力范围和影响强度。会上,空管中心要根据分析及所在机场的每小时的保障能力范围,立即制定应用于对应受限保障空域和机场的预战术流量限制方案。随后,运管委组织运行日相关航班计划的调整工作,与航空公司进行协调,确定航班的调整计划,为保证公平原则,会根据公司航班量的大小按照比例进行调整。会后,各航空公司结合公司自身情况按照比例要求对航班计划进行调整。机场运行部门根据各航空公司的调整计划再进行调整并与公司核对,航空公司将重新调整的计划向民航局发送调整申请电报,在运行日按照调整计划正常运行航班,并会做好航班取消及航班保护旅客的安置工作。

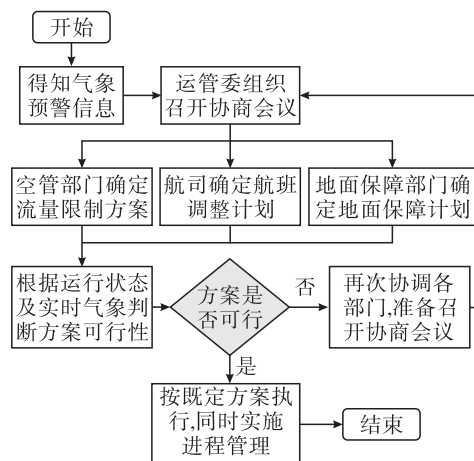


图 1 运管委组织协调航班计划流程图

机场地面保障单位也会按照需求,对保障人员、车辆等资源进行合理调配部署。运管委会对跑道除雪、航空器除冰等工作进行部署,满足保障任务达到飞行区内跑道、主滑行道同时开放使用的除冰雪原则,达到机位滑行线、机坪在跑道、滑行道开放前 10 min 可用的要求,根据机场保障能力计算机场小时保障容量。分时分段地进一步细化天气预警信息,结合机场的保障工作进展情况,对航班计划进行动态调整。对航班运行进程实施管理,按照 A-CDM 里程碑时间节点工作进度,监控并督促航班运行各项工作在时间节点内完成。

## 2 工作流程的 Petri 网模型

### 2.1 简单 Petri 网介绍

1962 年,德国一位博士的毕业论文中首次提出了利用网状结构来模拟通信系统的概念,由此而引发出一系列以网状结构对各类独立的系统进行模拟的研究,这种网状结构便以该博士的姓氏 Petri 命名<sup>[3]</sup>。Petri 网系统广泛应用于各个领域,可用来描述复杂的业务流程。由于本文描述的是复杂的组织协调运行工作流程,同时具有瞬时、延时的状态过程,并且需要对工作流程进行仔细地分析,以便找到工作流程中存在的信息闭塞节点或问题,因此选用 Petri 网系统这一强大的建模工具,进行工作流程的建模。

有向网为基本网,只含有变迁、库所和有向弧(流关系)3 个部分,并且不具备初始标识<sup>[4]</sup>。其中库所是表示状态的元素,用图形○表示。变迁是表示状态变化的元素,用图形■表示,变迁的功能是改变状态。有向弧用图形→表示,用于连接库所和变迁。采用网的基本建模理论对运管委组织及协调等工作流程系统进行网络建模,可以发现在建模过程中往往要考虑运行流程中运管委的状态及变化、信息资源情况、运行是否存在冲突现象等要素,这些要素在 Petri 网理论中以库所、变迁、托肯及有向弧的形式存在,作为 Petri 网系统的要素,库所在协调工作流程中表示运管委这一组织机构的状态。变迁在协调工作流程中表示各相关运行单位对工作的支持行为,模型中存在复合变迁、瞬时变迁及时间变迁三个种类。有向弧在协调工作流程中表示运管委完成协调工作前进步骤。简单 Petri 网的定义如下。

**定义 1** 满足下列条件的三元组  $N=(T,P;F)$  是一个不带标识的网:(a)  $T$  是变迁的有限集  $\{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$ ; (b)  $P$  是库所的有限集  $\{p_1, p_2, \dots, p_{|P|}\}$ ; (c)  $P \cap T \neq \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$ ; (d)  $F = F^+ \cup F^-$ ,  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ,

表示  $P$  和  $T$  之间流关系的有向弧集,其中  $\times$  为笛卡尔积,  $F^+$  为从变迁指向库所的弧  $f=(t,p)$ ,  $F^-$  为从库所指向变迁的弧  $f=(p,t)$ 。

库所和变迁之间总是会存在某种依赖或相互作用关系,用有向弧表示出库所和变迁之间的这种关系就等同于构造出一个简单的网系统。构造的简单网模型见图 2。

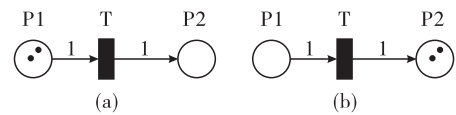


图 2 变迁前后状态

图 2(a)表示网的初始状态,意为在库所中有 2 个待加工的托肯,当系统开始运行后,库所 P1 中的 2 个托肯会经过有向弧,经过变迁 T,再通过有向弧流动到库所 P2 中,形成图 2(b)的状态。

### 2.2 航班调时调减工作流程模型及仿真

在此考虑将调时调减工作流程定义为:运管委从得知气象预警时产生对航班计划进行调整的需求,到当日航班计划中的航班按照计划完成调时工作离港或是取消航班的结果,为完成运行日航班安全高效离港形成的一系列航班计划调整工作以及保障工作所构成的链条。

利用 PIPE 仿真软件建立如图 3~5 的模型,在图 3 所示的顶层模型中,  $P1 \sim P4$  库所表示运管委从得知天气预警这一状态到完成运行日航班调整状态过程中,随着信息的传递与时间的变化,所产生的不同状态。而  $T1 \sim T3$  变迁表示为达到下一步状态,保证信息的传递,所进行的不同工作。Petri 网系统中根据基础流程的不同,

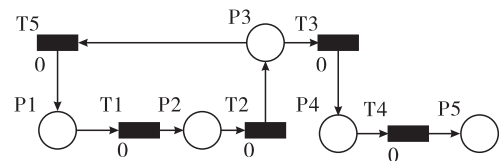


图 3 运管委管理工作流程顶层模型

允许有选择性变迁的存在。在顶层网模型中含有选择性变迁  $T1$ , 主要是因为在实际运行过程中的气象条件会存在与预期效果不一致的情况。实际气象条件与预报相差较大,将导致机场的保障能力与航班计划的需求不匹配,造成跑道不能按时满足航空器离场的需求,使航班不能正常运行而产生大面积延误的情况。如果实际运行中能够保证航班正常高效地运行,那么运管委只需要对航班接下来的进程进行监督管理,保障航班在时间节点内安全离港即可。若实际运行不满足预期的航班计划,那么运管委需要再次组织各运行相关部门进行协商,对航班计划等进行调整,直至实际运行状态可以满足航班计划,保证航班安全高效地完成离港。将  $T1$  变迁作为子模型进行建模,得到子模型如图 4 所示。

在顶层模型中,存在复合变迁  $T1$ ,表示运管委组织各相关运行单位进行协商会议。变迁前后的库所存在重叠的特点。重叠的库所在其代表的含义上是等价的<sup>[5]</sup>,库所  $P1$  和库所  $P5$  均表示运管委准备召开协商会议,  $P2$  和  $P15$  均表示得到航班调整措施及保障需求的状态,因此可以将  $P1$  及  $P5$  合并,等价选择用库所  $P1$  替换。  $P2$  与  $P15$  合并,等价选择用库所  $P2$  替换。得到如图 5 所示的运管委工作流程详细模型。

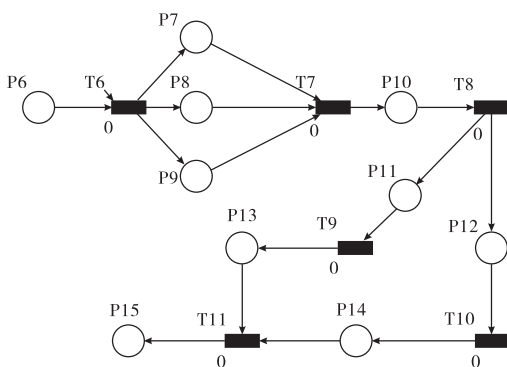


图 4 运管委工作流程子模型

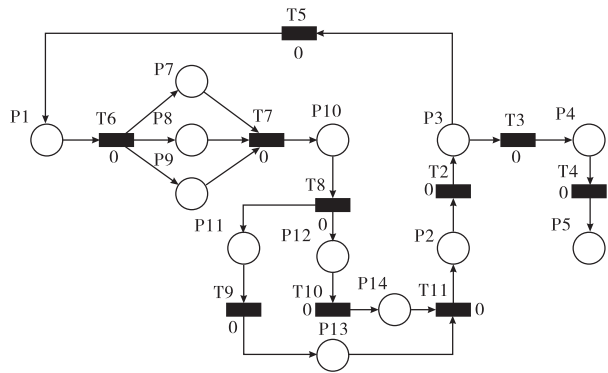


图 5 运管委工作流程详细模型图

本文所建 Petri 网模型中的库所与变迁都有与其对应的含义,工作流程模型中共计 15 个库所,  $P1$  与

P5, P2 与 P15 是等价库所。共计 11 个变迁, 其中 T5 与 T3 是选择性变迁, 具体含义如表 1、表 2 所示。

表 1 运管委工作流程模型库所含义说明

库所	含义说明	库所	含义说明
P1	运管委得知天气预警状态, 准备召开协商会议	P9	机场运行保障单位参加协商会议
P2	运管委得出航班调整措施及保障需求	P10	各单位气象专家准备预测天气影响强度及影响范围
P3	运管委准备判断航班调整计划和保障需求的合理性	P11	空管中心准备制定对应空域及机场的流量限制方案
P4	运管委准备进行航班进程管理	P12	保障单位准备制定跑道等区域保障工作方案
P5	运管委完成运行日航班的调整及离场状态	P13	空管中心给出流量限制方案
P6	运管委得知天气预警状态, 准备召开协商会议	P14	保障单位给出保障工作方案
P7	空管流量、气象等单位参加协商会议	P15	运管委得出航班调整措施及保障需求
P8	航司运行单位参加协商会议		

表 2 运管委工作流程模型变迁含义说明

变迁	含义说明	变迁	含义说明
T1	运管委组织各运行单位进行协商会议	T7	气象相关部门给出气象预测数据
T2	运管委组织协调航班调时调减工作及保障部署工作	T8	气象专家预测天气影响强度及影响范围
T3	判断航班调整计划和保障方案符合实际运行情况	T9	空管中心制定流量措施方案
T4	运管委对航班进行进程管理	T10	保障单位制定保障工作方案
T5	判断航班调整计划和保障方案不符合实际运行情况	T11	各航空公司制定航班调时调减方案
T6	召集各运行相关单位参加协商会议		

### 3 模型检验与性能分析

#### 3.1 模型检验

经过多次仿真试验, 对模型进行仿真时可以观察模型中托肯的流动情况, 发现当有 1 个托肯从输入库所出发, 到达输出库所后, 其他库所中都不存在托肯。当有  $N$  个托肯从输入库所出发, 仿真结束时, 输出库所也含有  $N$  个托肯, 且除输出库所外其他库所的托肯数皆为 0。通过对仿真过程及结果的分析, 证明本文所建网模型是具有活性的网, 且不存在死锁变迁<sup>[6-7]</sup>。

#### 3.2 网的性质

**定义 2(可达性)** 设四元组  $N=(T, P; F, M_0)$  为一个 Petri 网, 其存在某一个变迁  $t$ , 使初始标识  $M_0$  在其作用下达到标识  $M$ , 即  $M_0[t > M$ , 那么就可以称状态  $M_0$  可直接到达状态  $M$ 。以此类推, 假设存在变迁序列  $t_1, t_2, \dots, t_k$  和标识序列  $M_1, M_2, \dots, M_k$ , 满足  $M_0[t_1 > M_1[t_2 > M_{k-1}[t_k > M_k$ , 则称  $M_0$  可到达  $M_k$ 。记  $R(M_0)$  从初始标识  $M_0$  经过变迁作用后可达的所有状态标识的有限集合, 并规定  $M_0 \in R(M_0)$ 。

#### 3.3 模型可达性分析

可达性是 Petri 网的基础特性, 初始状态为:  $M_0=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]$ 。从  $M_0$  开始, 对模型的可达状态进行分析。利用 PIPE 软件的运管委工作流程仿真试验, 得到结果为图 6 所示的可达标识矩阵及可达视图。此图清楚地反映了模型中状态之间的相互关联情况。其中, 有 3 个消失状态表示瞬时变迁, S10 表示协调运行工作完成形成的状态停留。

### 3.4 workflow网

为进一步分析本文所建网模型,引入一类普遍存在的工作流网模型定义。

**定义 3(工作流网)** 假设存在某一网结构,满足网的概念,假如其输入库所的前置不存在其他的库所,输出库所的后置也不存在其他的库所,并且在输入库所和输出库所之间满足网的构成要求。任意加入一个变迁后,得到的网仍然具有强连通性,那么这种网就称之为工作流网。

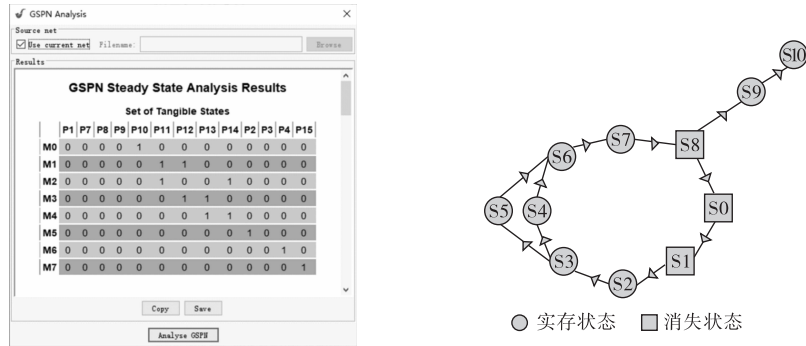


图 6 可达标识矩阵及可达标识图

将本文所建模型与工作流网模型的定义进行对比,明显可以看出论文所建模型满足工作流网的定义,是一个工作流网。工作流网中,初始库所、终止库所与同步发生的库所都是对工作流程进行管理的切入点,管理者在各个切入点对工作流做出决策,实现管理在工作流中贯穿始终,为工作流指明方向<sup>[8]</sup>。

通过一种广义随机 Petri 网理论(GSPN),对本文所建模型的性能进行分析。

**定义 4**  $GSPN=(T,P;M_0,\lambda)$  为一个广义随机 Petri 网,那么:(a)参数  $\lambda=(\lambda_1,\lambda_2,\dots,\lambda_m)$  是变迁平均引发速率集合,每一个平均引发速率表示在变迁发生时单位时间内平均引发次数;(b)变迁集合  $T=T_i \cup T_i, T_i \cap T_i = \emptyset$ ,其中  $T_i$  为时间变迁集,  $T_i$  为瞬时变迁集。

### 3.5 模型信息利用率分析

**定义 5(标记概率密度)** 对于  $\forall p \in P, \forall i \in N$ , 标记概率密度函数为  $P[M(p)=i] = \sum P[M_i]$ , 其中  $P[M(p)=i]$  表示  $p$  中包含  $i$  个标记的概率。

PIPE 软件还可以进一步求出每一库所中的平均托肯数量  $\bar{\mu}_i, \mu_i$  表示托肯的数量。 $\bar{\mu}_i$  可以反映出运管委工作流程的每一环节对信息资源的利用率<sup>[9]</sup>。在模型稳定的情况下,平均托肯数量由公式  $\bar{\mu}_i = \sum j \times P_{(=j)}$  得到。利用 PIPE 软件得到的模型中库所平均托肯数如图 7 所示。

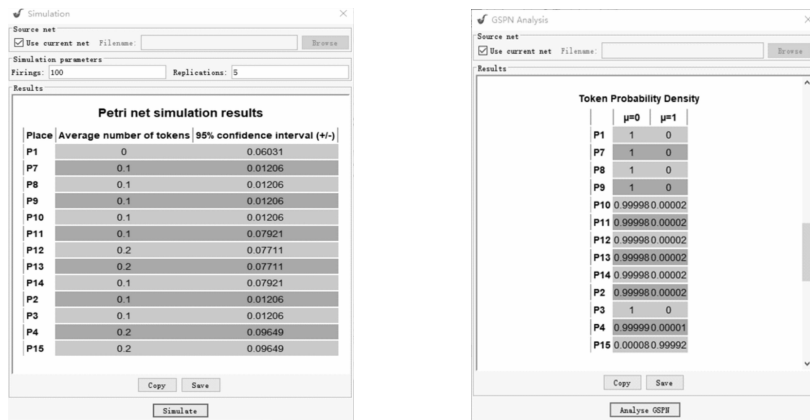


图 7 库所托肯标记密度及库所平均托肯数

可以看出,除了表示预设的气象预警信息库所 P1 之外,其他库所的托肯数分布都比较均匀。在它们

之中相互比较,地面保障单位制定工作方案、空管部门制定流量限制方案以及确定航班调整计划库所平均托肯数量较多,体现了这三个流程较高的信息利用率<sup>[10-14]</sup>。表明在这些环节信息流转频繁,业务负荷大,在实际运行环节时,要加强实时的信息共享互通。

#### 4 结论

随着我国民航数字化转型及协同运行机制的发展,优化民航运行流程,提高协同决策能力迫在眉睫。本文总结了民航机场联合运行管理委员会对航班调时调减管理工作流程,并建立了基于 Petri 网的工作流程仿真模型,并证明了该模型的可达性。通过分析模型的概率密度,找出了运管委对航班调时调减管理工作流程中存在信息利用率较高的三个环节,分别是地面保障单位制定工作方案环节、空管部门制定流量限制方案环节以及确定航班调整计划环节。通过确定信息利用率较高的环节,找到智能决策及信息共享中存在的瓶颈,可以为未来民航优化运行流程奠定基础。

#### 参 考 文 献:

- [1] 韩路亚. 协同决策机制下的航班延误预警研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2020.
- [2] 伍岳. 协同决策环境下航空公司航路选择优化研究[D]. 德阳:中国民用航空飞行学院,2019.
- [3] SORIN E Z, CASANDRA V P. Challenges in airport digital transformation[J]. *Transportation research procedia*, 2018, 35: 90 - 99.
- [4] SULTAN A, ROBERT L B, PRASAD K Y. Framework for airport outbound passenger flow modelling[J]. *Procedia engineering*, 2017, 174: 1100 - 1109.
- [5] 袁崇义. Petri 网应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [6] WERTHER B, MOEHLENBRINK C, RUDOLPH M. Colored Petri Net based formal airport control model for simulation and analysis of airport control processes[C]. *Berlin: International Conference on Digital Human Modeling*, 2007: 1027 - 1036. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73321-8\\_115](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73321-8_115).
- [7] VIDOSAVLJEVIC A, TOSIC V. Modeling of turnaround process using petri nets[C]. *Belgrade: 2010 World Conference of Air Transport Research Society*, 2010.
- [8] 胡晓文,曾庆田. 基于 Petri 网的工作流时间和资源管理研究综述[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(S2): 59 - 62.
- [9] 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.
- [10] 黄学林,王观虎,陈奇奇,等. 基于 Petri 网军民共用停机坪运行仿真与分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(2): 841 - 849.
- [11] 张书琴,马辰婷,朱嘉楠,等. 基于时延 Petri 网的机坪作业调度时间弹性提高方法[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(5): 103 - 107.
- [12] 潘卫军,杨磊,朱新平,等. 繁忙机场机坪运行过程着色 Petri 网建模[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(1): 52 - 56.
- [13] 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.
- [14] 丁建立,陈坦,坦徐涛. 基于时间 Petri 网的航班延误链式反应模型构建[J]. *系统仿真学报*, 2008(14): 3888 - 3891.

(下转第 96 页)

## Numerical Simulation and Experiment of Different Quenching Temperature of GCr15 Steel Cross Shaft

YAO Fang, HU Bin, JIA Hui-xing

(College of Mechanical and Automotive Engineering,  
Chuzhou Polytechnic, Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** The effects of quenching at three different temperatures on microstructure evolution and hardness of GCr15 steel are studied by numerical simulation and experiment. Using Deform-3D software, the numerical simulation model of the cross shaft is established, and the temperature change curve, the microstructure cloud chart after quenching and the hardness of the surface and core are obtained. Finally, GCr15 steel samples are quenched at three temperatures, and the microstructure and hardness at different temperatures are obtained by metallographic microscope and rockwell hardness tester. The results of quenching test are similar to that of numerical simulation. At 840 °C, the maximum hardness and the maximum content of Martensite are obtained. However, the results of microstructure and hardness are poor at 800 °C and 880 °C because of too low and too high quenching temperature.

**Keywords:** quenching; numerical simulation; hardness; Martensite

(责任编辑:王新亮)

~~~~~  
(上接第 19 页)

## Simulation Study on Flight Timing and Reduction Workflow of Airport Transportation Management Committee Based on Petri Network

HUANG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>2</sup>

(1. General Aviation Industry Development Research Center, Shenyang Aerospace University;  
2. Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In recent years, the civil aviation industry is in a period of digital transformation and the construction of a collaborative operation mechanism, and the demand for air transport services has increased significantly. It is imperative to optimize the operation workflow and to improve the efficiency of civil aviation operation. In this paper, the workflow of the civil aviation airport joint operation management committee on the adjustment and reduction of airport flights is summarized under the background of digital transformation. The workflow is simulated based on the modeling theory of the Petri network system, and the performance of the simulation model is analyzed to find out the links that are prone to bottlenecks in the operation process. Combined with the current digital development process of the civil aviation industry, the strategy of how to apply the new system of civil aviation digital transformation at key operating nodes is put forward. It can provide a decision-making basis for civil aviation to seize the opportunity of digital transformation and optimize the operation workflow.

**Keywords:** airport transportation management committee; Petri network; simulation modeling

(责任编辑:唐立平)