

6-16-2022

Airport Flight Transit Support Time Collaborative Planning Modeling Based on STN

Bin Chen

1.College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;2.Research Base of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; chenbindavid@163.com

Yue Liu

1.College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;2.Research Base of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Yalei Yang

1.College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;2.Research Base of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Airport Flight Transit Support Time Collaborative Planning Modeling Based on STN

Abstract

Abstract: Under the constraint of resources, the collaborative planning of airport flight transit support time is one of the effective methods to improve airport operation efficiency. *Based on Simple Temporal Network (STN), a planning model of flight transit support time is established. Based on the temporal decoupling, the shortest path matrix simplification, and the distance graph solving of STN task model considering resources, the method of collaborative planning of flight transit support time for airport considering resources is obtained.* The comparison results of the simulation and the actual data show that STN task model considering resources can optimize the airport flight transit support time collaborative planning and reduce the resource consumption of flight transit support time. It also provides a new research idea for the collaborative planning of flight transit support time.

Keywords

simple temporal network, flight assurance, support time, collaborative planning

Recommended Citation

Bin Chen, Yue Liu, Yalei Yang. Airport Flight Transit Support Time Collaborative Planning Modeling Based on STN[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(6): 1196-1207.

基于 STN 的机场航班过站保障时间协同规划建模

陈斌^{1,2}, 刘悦^{1,2}, 杨亚磊^{1,2}

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 航空地面特种设备研究基地, 天津 300300)

摘要: 资源受限下的机场航班过站保障时间协同规划是提高机场运行效率的有效方法之一。针对机场实际, 建立基于简单时间网络(*simple temporal network*, STN)描述的航班过站保障时间规划模型。采用时间解耦方法、最短路径矩阵简化和求解考虑资源的 STN 任务模型距离图, 得到面向机场考虑资源的航班过站保障时间协同规划方法。仿真和实际数据对比结果表明: 考虑资源的 STN 任务模型起到优化机场航班过站保障时间协同规划, 减少航班过站保障时间资源占用的作用, 为航班过站保障时间协同规划提供新的研究思路。

关键词: 简单时间网络; 航班保障; 保障时间; 协同规划

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)06-1196-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-1057

Airport Flight Transit Support Time Collaborative Planning Modeling Based on STN

Chen Bin^{1,2}, Liu Yue^{1,2}, Yang Yalei^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Research Base of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Under the constraint of resources, the collaborative planning of airport flight transit support time is one of the effective methods to improve airport operation efficiency. Based on Simple Temporal Network (STN), a planning model of flight transit support time is established. Based on the temporal decoupling, the shortest path matrix simplification, and the distance graph solving of STN task model considering resources, the method of collaborative planning of flight transit support time for airport considering resources is obtained. The comparison results of the simulation and the actual data show that STN task model considering resources can optimize the airport flight transit support time collaborative planning and reduce the resource consumption of flight transit support time. It also provides a new research idea for the collaborative planning of flight transit support time.

Keywords: simple temporal network; flight assurance; support time; collaborative planning

引言

航班过站地面保障业务是机场保障服务的重要环节, 是机场运行效率的重要影响因素之一。最新调查结果显示近年来我国机场年度出港航班量涨幅维持在 35% 左右, 2019 年达到 481.9 万班次。出港航班架次攀升导致机场航班过站保障压力随之增

加, 特别是机场协同能力不足问题会更加凸显。科学合理地优化过站保障有限时间资源是提高机场运行效率、缓解航班过站压力的有效方法之一^[1]。

国内外学者针对航班过站保障任务协同和资源调度优化问题进行了相关研究, 取得了一定成果。在任务协同方面, 樊玮等^[2]开发了飞机过站地面保障作业多 Agent 调度系统 Dis-DSS, 用来模拟

收稿日期: 2020-12-30 修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(U1933107)

第一作者: 陈斌(1974-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为机场地面保障技术与控制。E-mail: chenbindavid@163.com

航班保障服务设备间的协同工作性能; 何丹妮^[3]对航班地面服务车辆服务流程、机场资源配置情况以及航班过站地面服务窗等多种约束条件, 以车辆数量最小化、车辆行驶总里程最小化为目标建立摆渡车调度模型, 根据动态更新的航班信息制定求解策略, 为机场航班过站服务车辆配置提供建议; Hunsberger L^[4]利用STN(simple temporal network)研究了保障作业的时间约束关系, 实现了作业时间的规划, 但忽略了保障资源实际作业的约束影响。在资源调度方面, 王青召^[5]在停机位资源有限情况下, 提出了禁忌搜索算法模型求解策略。在首都国际机场的实际运行数据显示, 所构建模型减少了相邻机位间推出-滑出冲突, 提高了近机位利用率, 但缺少与机场其他资源协同调度的研究; 陈焯^[6]针对大型枢纽机场地服保障排班方法效率低的问题, 提出基于容量动态评估的地服保障排班优化方法, 但该模型使用范围有一定局限性; 许晨晨等^[7]从机场地面保障设备工作时间不确定性出发, 研究了机场地面服务设备调度优化问题, 根据作业时间波动性建立设备工作模型, 以提高设备调度对不确定时间波动的适应性; Du等^[8]对航班过站作业中的牵引车调度问题进行研究, 将牵引车作业调度描述为带有时间窗约束问题, 并以最小化运营成本为优化目标、以牵引车运营限制为约束建立模型, 使用列代启发式算法对模型进行求解。

相关的研究成果虽然较为丰富, 但还存在以下不足: ①在航班过站保障任务协同方面, 基于Agent系统的研究多在各部门信息交互的基础上进行设计, 不能很好地反映机场各部门的自主特性, 脱离了航班保障作业实际, 目前在机场实际业务中较难实现; ②研究大多以减少设备使用数量或最大设备使用率为目标, 缺乏在考虑资源受限保障时间和资源协同规划问题的研究。鉴于此, 本文面向机场保障能力亟需增强的需求, 聚焦保障环节作业时间规划问题, 建立面向机场实际资源受限的航班保障时间协同规划模型, 实现各保障部门作业时间的协同。

1 问题描述

航班过站地面保障过程是指航班进港后滑行至停机位, 从放轮挡开始对飞机进行一系列保障服务, 在撤轮档后滑行至跑道起飞并开始新的航班飞行任务^[9]。航班过站保障具有离散的进港和离港时间, 随机和动态的载客量及载货量, 并且不同保障作业服务设备的作业效率也存在动态变化, 是多随机因素的离散动态过程, 属于定位型和Jobshop的混合问题^[10]。航班过站保障作业通常根据不同的服务对象划分为3类, 分别是对旅客、行李货邮和航空器的保障作业, 其中具体的保障作业环节包括轮挡、旅客上下机、行李货运的装卸、航油加注、加清排污、航食、机舱清洁和除冰等, 如图1所示。

航班过站地面保障过程具体资源受限的影响为保障作业会受到安全、空间要求及航空公司政策所施加的优先限制的影响^[11], 需遵从各保障环节并行或串行的作业时间约束, 根据作业流程图可得到保障环节之间的定性时间约束。例如, 考虑到作业安全问题, 加油作业不能与旅客下机或登机同时进行。同时保障流程间还存在定量的时间约束, 包括完成各保障作业需要的时间约束和其他持续时间约束。例如, A320机型的旅客上机作业时间一般为13.5~15.5 min, 考虑到乘客的等待焦虑问题, 规定旅客登机结束15 min内要完成撤轮档作业^[12]。另外由于飞机对设备占用的排他性, 在实际作业中还要考虑保障资源及机型、行驶路径等因素对不同环节间协同保障的影响。

由于各作业部门之间相互独立, 导致不同部门作业在时间和资源等的约束关系耦合复杂, 很难实现协同调度。为保证不同部门间的作业协同, 可用时间与资源约束满足问题对该过程进行描述。在满足因机场、航空公司、机型、天气等多因素影响下的定量与定性时间约束后, 考虑有限的机场保障资源, 需对各作业的可执行时间范围做出规划, 为机场保障资源的协同调度提供时间窗口。

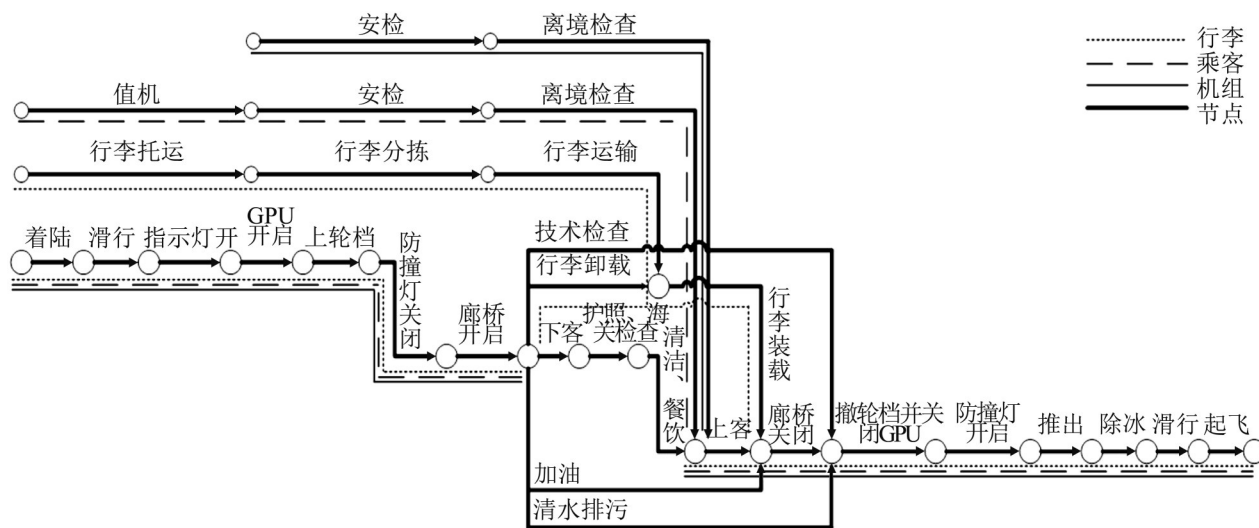


图1 航班过站保障服务流程
Fig. 1 Procedures of flight transit support service

2 基本定义

2.1 简单时间网络

定义1 约束满足问题(temporal constraint satisfaction problem, TCSP): 在现实生活中, 很多问题都需要对多个活动或任务之间的时间约束进行处理, 而分析和求解该类问题的一种有效途径是将问题描述为时间约束满足问题。机场过站保障问题就属于典型的时间和资源约束满足问题。

约束满足问题用约束网络来描述, 可表示为一个三元组 (V, M, H) , V 为变量的集合; M 为每个变量值域的集合; H 为变量间约束关系的集合^[13]。

定义2 简单时间问题(simple temporal problem, STP): 指TCSP的任2个时间变量之间的约束都可以用1个区间表示。STP可表示为 $S = \langle T, H \rangle$, 其中, $T = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ 为时间变量集合; H 为 T 中时间变量之间约束关系的集合。对任意的约束 $h \in H$ 都具有这样的形式, $h \in H_{ij}$: $a_{ij} \leq x_j - x_i \leq b_{ij}$ 。时间变量集合中, t_{can} 是一个固定的时间值, 取值为0, 被称为时间参照点。

定义3 简单时间网络(simple temporal network, STN): 一般STP用STN来描述和求解。STN是一个有向带约束网络图 $G = \langle V, K \rangle$, 节点

集合 V 是所有时间点变量的集合, 如果集合 H 中存在约束 $h_{ij}: a_{ij} \leq x_j - x_i \leq b_{ij}$, 则在边的集合 K 中增加边 $i \rightarrow j$, 并标注其权 $[a_{ij}, b_{ij}]$, 这样就可以得到STP对应的STN网络图。

定义4 面向任务的简单时间网络:(STN-TM) 记为 S' , S' 可表示为一个四元组 $\langle T', H', R', Q' \rangle$, 其中 $T' = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ 为一系列时间点变量集合, 表示任务中涉及的各个作业时间点; $H' = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ 为一组二进制约束集合, 表示作业时间点之间的时间约束关系; $R' = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 为一组与作业对象有关的定量数字集合, 表示各约束作业时间内所占用的资源变量集合; $Q' = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ 为一组与任务实际有关的数字集合, 表示各约束作业所具有的资源总量集合。

2.2 简单时间网络与距离图

将有向带约束网络图 G 中表示时间区间约束的边, 用2条区分正负权值的有向边表示, 例如, 将上述约束表示为 $t_j - t_i \leq b_{ij}$ 和 $t_i - t_j \leq -a_{ij}$, 从而将STN网络图等价地转化为有向距离图 $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$ 。STN的距离图可以较好地表示STN的时间约束关系, 便于进行时态推理, 如图2所示。

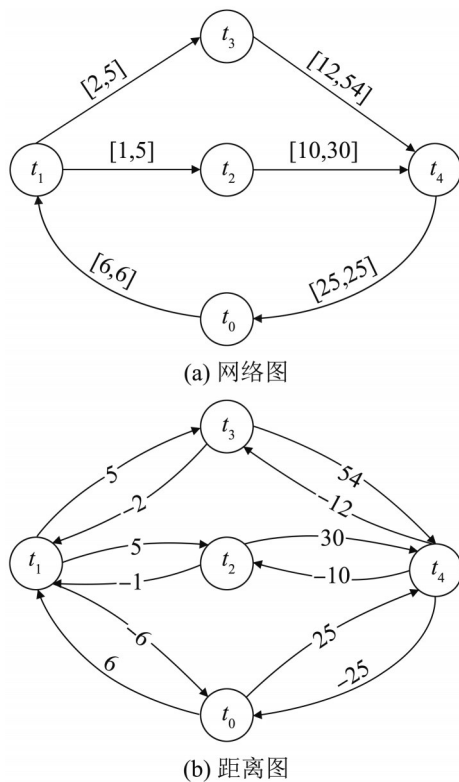


图2 STN网络图与距离图

Fig. 2 STN network diagram and distance diagram

由上述定义可知, STN的解是一系列满足在集合 H 中所有约束赋值点变量的集合 $\{t_0 = v_0, t_1 = v_1, \dots, t_n = v_n\}$ 。若STN具有至少1组解 S_0 , 则称该STN是一致的, 否则表明计划中存在时间冲突。

若从时间节点 $i \sim j$ 有多条路径, 且所有路径都满足 $t_j - t_i \leq d_{ij}$, 称 d_{ij} 为 i 到 j 的最短路径。通过对STN的距离图进行时态推理可得所有点之间的最短路径, 称之为STN的矩阵 D_d , 并且对任一时间一致的STN, 它的任务节点 i 开始的时刻 t_i 可以分配为 $[-d_{i0}, d_{0i}]^{[14]}$ 。对于图2中的STN来说, 其最短路径矩阵如表1所示。

表1 STN的最短路径
Table 1 Shortest paths of STN

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
t_0	0	6	11	11	25
t_1	-6	0	5	5	19
t_2	-7	-1	0	4	18
t_3	-8	-2	3	0	17
t_4	-25	-19	-14	-14	0

由上述定义可知, 图2中 $t_1 \sim t_4$ 任务节点开始时刻的时间范围分别为 $[6, 6]$ 、 $[7, 11]$ 、 $[8, 11]$ 、 $[25, 25]$ 的时候, 满足STN中的时间约束关系。

2.3 时间约束表示与转化

(1) 时间约束类型与表示。为实现整体作业的协同, 需遵从各部分任务之间的时间约束关系, 时间的约束满足问题往往由时间点变量和时间区间变量之间的约束构成。

(2) 变量与约束之间的转化。为使用简单时间网络对任务中时间约束满足问题进行描述, 需根据时间点变量和时间区间变量间转化规则, 将每个子任务中所有区间时间变量转化为点时间变量, 作为STN的时间变量集合 T 的一部分。同时根据约束转化规则将定性约束关系转化为点时间变量的二元约束关系, 作为STN约束集合 H 的一部分。

3 基于STN的机场航班过站保障建模

3.1 单航班STN模型

(1) 时间变量集合建立

航班过站保障过程中, 在放轮挡至撤轮挡期间有一系列保障活动, 这些作业活动中, 放轮挡和撤轮挡为点时间变量, 其他保障服务为区间时间变量。根据约束条件的转化规则可知, 一个区间时间变量可用2个点时间变量表示, 即每项作业开始和结束时间点变量。所以对单航班过站保障过程来说, 考虑到STN的时间参照点 t_{can} 共包括19个点时间变量, 可用时间变量集合 $T_{\text{dan}}(t_0 \sim t_{18})$ 表示。

(2) 定性时间约束表示

航班过站保障过程中各保障作业之间存在逻辑上的先后顺序, 可用定性时间约束描述。该过程中定性时间约束包括: 各保障环节的作业任务都要在上轮挡与撤轮挡点时间变量之间完成; 在上轮挡后方可进行行李货运、旅客下机与加清排污作业; 行李货运作业先进行卸载作业再进行装

载作业；航油加注、机舱清洁和航食配备作业需要在旅客上下机作业之间进行；除冰作业要在旅客上机结束后进行，并在撤轮挡前完成等约束关系。

(3) 定量时间约束表示

定量时间约束即2个作业变量间的时间间隔，表示作业的持续时间或两作业间的间隔时间。例如，定量时间约束为 $13 \leq t_9 - t_8 \leq 15$ ，根据差分约束不等式的含义表示从加航油开始到结束需要最少13 min并且不能超过15 min。根据航班过站保障标准^[15]可得5类航空器的各保障环节最少作业时间约束值，将此值作为各变量定量时间约束的下限。而该变量的定量约束上限则取决于机场的繁忙程度和保障能力，但都在最小作业时间基础上增加一定的时间裕量以应对实际情况。

(4) 时间约束集合确定

得到各时间点变量间定量时间约束的上下限权值，综合定量和定性时间约束关系可得STN模型中的时间约束集合 H_{dan} 。由于不同机型的定量时间约束关系不同，可用表2中约束集合 $H_{\text{dan}}(h_1 \sim h_{23})$ 来描述A320过站保障过程的所有点时间变量之间定性与定量约束关系。

表2 单航班时间约束信息表

定量时间约束信息	约束表示
I_1, I_2 在 T_1 后2 min内开始	H_1, H_2
I_1 需要9.5~11.5 min	H_3
I_2 需要31.8~50 min	H_4
I_3 需要20~40 min且不晚于关舱门前20 min完成	H_5, H_6
I_4 需要17~35 min	H_7
I_5 最多需要20~30 min	H_8
I_6 需要22.2~35 min	H_9
I_7 最少需要18~28 min	H_{10}
I_8 需要10~15 min	H_{11}
T_1 完成早于 I_3 开始	H_{12}
I_1 完成早于 I_4, I_5, I_6 开始	H_{13}, H_{14}, H_{15}
I_6 完成早于 I_5 完成	H_{16}
I_4, I_5, I_6 完成早于 I_7 开始	H_{17}, H_{18}, H_{19}
I_7 完成早于 I_8 开始	H_{20}
I_2, I_3, I_7 完成早于 T_2	H_{21}, H_{22}, H_{23}

在表2中， T_1 为放轮挡点时间变量； T_2 为撤轮挡点时间变量； I_1 为旅客下机区间时间变量； I_2 为行李货运区间时间变量； I_3 为加清排污区间时间变量； I_4 为航油加注区间时间变量； I_5 为机舱清洁区间时间变量； I_6 为航食配备区间时间变量； I_7 为旅客上机区间时间变量； I_8 为除冰作业区间时间变量。将上述区间时间变量用点时间变量表示，同时将定性时间约束关系转化为定量时间关系，并用差分约束不等式表示，可得A320航班过站保障过程的时间约束集合 H_{dan} ，结果如表3所示。

表3 航班过站保障过程转化后的约束关系

Table 3 Constraint relation after transformation of flight transit ground support process

约束编码	规范表达	约束编码	规范表达
H_1	$0 \leq t_2 - t_1 \leq 2$	H_{13}	$-\infty \leq t_3 - t_8 \leq 0$
H_2	$0 \leq t_4 - t_1 \leq 2$	H_{14}	$-\infty \leq t_3 - t_{10} \leq 0$
H_3	$9.5 \leq t_3 - t_2 \leq 11.5$	H_{15}	$-\infty \leq t_3 - t_{12} \leq 0$
H_4	$31.8 \leq t_5 - t_4 \leq 50$	H_{16}	$-\infty \leq t_{13} - t_{11} \leq 0$
H_5	$20 \leq t_7 - t_6 \leq 40$	H_{17}	$-\infty \leq t_9 - t_{14} \leq 0$
H_6	$-\infty \leq t_7 - t_9 \leq -20$	H_{18}	$-\infty \leq t_{11} - t_{14} \leq 0$
H_7	$17 \leq t_9 - t_8 \leq 35$	H_{19}	$-\infty \leq t_{13} - t_{14} \leq 0$
H_8	$20 \leq t_{11} - t_{10} \leq 30$	H_{20}	$-\infty \leq t_{15} - t_{16} \leq 0$
H_9	$22.2 \leq t_{13} - t_{12} \leq 35$	H_{21}	$-\infty \leq t_5 - t_{18} \leq 0$
H_{10}	$18 \leq t_{15} - t_{14} \leq 28$	H_{22}	$-\infty \leq t_7 - t_{18} \leq 0$
H_{11}	$10 \leq t_{17} - t_{16} \leq 15$	H_{23}	$-\infty \leq t_{15} - t_{18} \leq 0$
H_{12}	$-\infty \leq t_1 - t_6 \leq 0$		

(5) 单航班过站保障有向距离图的建立

综上所述，单航班过站保障过程涉及的点时间变量为19个，用集合 $T_{\text{dan}}(t_0 \sim t_{18})$ 表示，变量间的差分时间约束关系共有23个，用约束集合 $H_{\text{dan}}(h_1 \sim h_{23})$ 表示。根据STN定义，单航班的差分时间约束关系共有23个，用约束集合 $H_{\text{dan}}(h_1 \sim h_{23})$ 表示。根据STN定义，单航班过站保障的STN模型可表示为 $S_{\text{dan}} = \langle T_{\text{dan}}, H_{\text{dan}} \rangle$ ，其中集合 $T_{\text{dan}}(t_0 \sim t_{18})$ 表示过程中的19个点时间变量，约束集合 $H_{\text{dan}}(h_1 \sim h_{23})$ 表示变量间的所有时间约束关系。将单航班过站保障过程等价地转化为STN网络图 $G_{\text{dan}} = \langle V_{\text{dan}}, E_{\text{dan}} \rangle$ 和距离图 $G_{\text{dand}} = \langle V_{\text{dand}}, E_{\text{dand}} \rangle$ 分别如图3~4所示。

对多航班过站保障STN模型表示为 $S_{\text{duo}} = \langle T_{\text{duo}}, H_{\text{duo}} \rangle$, 时间点变量集合为 $T_{\text{duo}} = (t_0, t_1, \dots, t_{18n+1})$, 所有航班内的作业时间约束和航班间的作业时间约束关系构成STN的约束集合 $H_{\text{duo}} = (h_1, h_2, \dots, h_{24n})$ 。

3.3 考虑资源的机场过站保障STN任务模型

机场过站保障是针对多架航班兼具时间和资源约束关系耦合的复杂作业过程。每一架航班都有多个保障作业需求, 每个作业开始和结束会涉及一系列时间点变量, 这些时间点变量构成了STN任务模型 S' 中的变量集合 T' , 作业时间点之间的定性与定量约束关系构成了 S' 中的集合 H' 。最后在每项作业的结束时间点增加资源约束信息。所以考虑资源的机场多航班过站保障STN任务模型, 可表示为一个四元组 $S' = \langle T', H', Q', R' \rangle$ 来表示, 其中 T' 为一系列时间点变量集合 $\{t_0, t_1, \dots, t_n\}$, 表示航班保障过程涉及的作业时间点; H' 为一组二元约束集合 $\{h_1, h_2, \dots, h_m\}$, 表示保障作业变量间的时间约束关系; Q' 为一组表示完成各保障环节的资源总量集合 $\{q_1, q_2, \dots, q_k\}$; R' 为一组表示各保障环节在作业时间内所占用的资源数量集合 $\{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ 。不同的机型所需的资源数量可能存在差别: 例如, 除冰作业环节针对A、B、C类机型, 机坪除冰作业使用一辆除冰车即可。但对D、E类机型来说需要2辆及以上的除冰车同时作业。这样在STN模型基础上增添了保障作业过程中的资源约束关系, 构成考虑资源的机场过站保障STN任务模型。

4 模型优化求解

4.1 基于时间解耦问题的STN模型简化

计划解耦问题(plan decoupling problem, PDP)是指对既能完成全局作业, 同时多个作业部门作业计划不存在冲突的一类问题的求解^[16]。时间解耦问题(temporal decoupling problem, TDP)是指各Agent作业之间的约束为时间约束关系时的计划解耦问题^[17]。

(1) 时间解耦定义

STN模型描述对象为简单时间问题, 属于时间约束满足问题中的一种, 所以对STN模型求解的问题属于时间解耦问题。当模型的时间点变量较多且时间约束关系复杂时, 可利用TDP相关理论和算法对STN模型分析并求解。

(2) TDP算法流程

TDP求解算法的基本思想是将复杂STN通过时间解耦的方式划分为多个独立的子STN, 在子STN变量与时间参照点 t_{can} 之间增加合适的约束并删除子STN之间的约束关系。TDP算法对待解耦的STN模型进行一致性检测, 对一致的STN进行时间解耦的操作后得到2个或多个子STN, 且与未进行解耦前的全局STN等效。通过STN时间解耦的过程, 消除子STN作业之间的时间约束关系, 并且能够保证子STN模型的解合并后仍为全局STN模型的解, 从而简化STN模型。

4.2 基于Floyd-Warshall算法的最短路径矩阵 D_d 求取

由定义可知, STN的解是一组赋值的点变量 $\{t_0 = v_0, t_1 = v_1, \dots, t_n = v_n\}$, 并且满足在STN约束集合 H 中的所有约束。针对航班过站保障STN模型, 可根据STN距离图 G_d 得到每条弧对应的权值, 利用Floyd-Warshall算法计算 G_d 中任意2节点之间的时间最短路径, 最终得到STN的最短路径矩阵 D_d 。

根据最短路径矩阵 D_d 和TDP算法可得到各保障部门作业的所有可执行范围, 即时间点变量的最早开始时间和最晚开始时间。

4.3 考虑资源的机场过站保障STN任务模型求解

对于多航班过站保障STN模型, 结合机场实际资源状况, 通过以下步骤求解考虑资源的机场过站保障STN任务模型:

step 1: 根据航班架次, 以 t_{can} 划分时间变量集合 T , 将每架次航班看作一个子STN;

step 2: 使用TDP求解算法, 去除航班间的时间约束;

step 3: 根据保障部门数量, 以 t_{can} 划分时间变量集合 T , 将每个保障部门或单位的保障作业都看作一个子STN;

step 4: 使用TDP求解算法, 去除保障作业的时间约束;

step 5: 将复杂机场多航班STN转化为多个独立的子STN, 重复上述方法, 得到多航班协同的作业时间规划;

step 6: 将时间变量、时间约束和资源约束进行抽象得到四元组集合, 根据TDP算法和最短路径矩阵 D_d 求解STN任务模型, 得到考虑资源的过站保障协同作业时间规划。

5 实例仿真

5.1 仿真数据及参数设置

以大连周水子机场2017-11-12日的过站航班保障为例, 该日共计划降落234架次航班, 有效数据为197架次航班, 去除纯货运航班外有16种机型共计183架次航班。各航班机型及计划开始保障时间如表5所示。

表5 大连周水子机场航班计划表

航班号	机型	计划开始
3U8812	A325	2017-11-12 T 07:25
3U8814	B752	2017-11-12 T 08:00
9C8844	B772	2017-11-12 T 08:10
...		
GS6421	E190	2017-11-12 T 15:35
GS6409	MA60	2017-11-12 T 15:40
...		
SC8860	A320	2017-11-12 T 23:45
SC8772	B738	2017-11-12 T 23:50
TR151	B738	2017-11-12 T 23:55
XW871	A321	2017-11-12 T 23:55

根据多航班过站保障STN模型构建过程, 建立该日183架次航班STN模型, 其中时间变量集合 T 根据表4可得, i 的取值范围是0~182, 故 $T_{di} =$

$(t_0, t_1, \dots, t_{3,295})$, 时间参照点 t_{can} 取值为0; 根据当天航班计划, 参照时间为07:25。大连机场的航班过站保障最大作业时间如表6所示, 根据最小作业时间保障标准可得到16种机型5类航班保障的定量时间约束; 根据作业流程假设各机型保障的定性时间约束相同。据此可建立面向该日多航班的STN模型 $S_{di} = \langle T_{di}, H_{di} \rangle$ 。

表6 大连机场各类机型最大允许作业时间
Table 6 Maximum allowable operating time of all types of aircraft at Dalian Airport

作业类别	机型分类			
	A	B	C	D
下机	9.5	11.5	11.5	22.5
行李货运	35.0	50.0	50.0	65.0
加清排污	30.0	40.0	40.0	50.0
清洁	20.0	30.0	30.0	35.0
加航油	20.0	35.0	35.0	45.0
航食配备	20.0	35.0	35.0	45.0
上机	15.5	15.5	28.0	42.5
除冰	10.0	12.0	15.0	15.0

考虑机场运行时的资源情况, 在多航班STN模型的基础上增加各作业占用资源约束和资源总量约束。据统计该日航班中A、B、C类机型占航班总数的97.8%, 且A、B、C类机型对保障资源占用量为1, 因此设定 R'_{di} 集合中所有作业的保障资源占用量为1, $R'_{di} = \{1, 1, \dots, 1\}$ 。如表7所示, Q'_{di} 集合为大连机场的实际保障资源数量, $Q'_{di} = \{29, 13, \dots, 3\}$ 。将资源约束关系附加在多航班STN模型得到考虑机场资源的航班过站保障任务模型, 其部分距离图如图5所示。

表7 大连机场部分保障设备清单

Table 7 List of partial support equipment of Dalian Airport

特种设备	资源数目
客梯车	29
传送带车	13
航空垃圾车	10
加油车	12
航空食品车	10
除冰车	3
撒布车	3

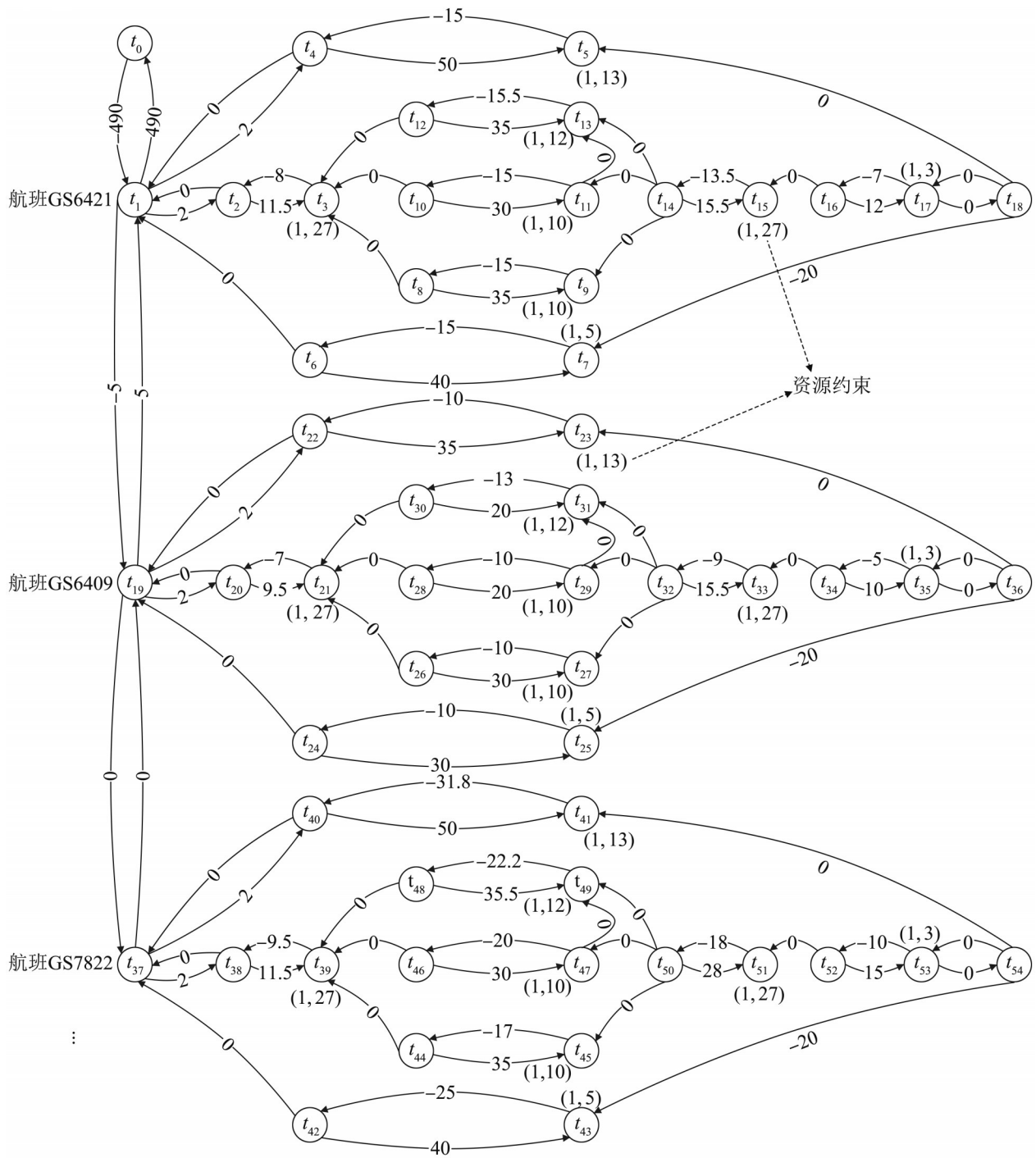


图 5 考虑资源的机场过站保障 STN 距离图 G_{dld}
Fig. 5 STN distance diagram of airport transit support considering resources G_{dld}

5.2 考虑资源的机场过站保障 STN 任务模型求解

为求解多航班 STN 模型，得到各保障部门的协同作业时间规划，将 T 划分为 T'_1, T'_2, \dots, T'_8 ，分

别对应于旅客下机、行李货运、加清排污、航油加注、机舱清洁、航食配备、旅客上机和除冰服务，即：

$$T'_1 = \{t_0, t_{18i+2}, t_{18i+3}\}, T'_2 = \{t_0, t_{18i+4}, t_{18i+5}\}$$

$$T'_3 = \{t_0, t_{18i+6}, t_{18i+7}\}, T'_4 = \{t_0, t_{18i+8}, t_{18i+9}\}$$

$$T'_5 = \{t_0, t_{18i+10}, t_{18i+11}\}, T'_6 = \{t_0, t_{18i+12}, t_{18i+13}\}$$

$$T'_7 = \{t_0, t_{18i+14}, t_{18i+15}\}, T'_8 = \{t_0, t_{18i+16}, t_{18i+17}\}$$

其中 $i = \{0, 1, \dots, n-1\}$, 将其作为本文求解模型的输入。

对STN使用TDP时间解耦和求解算法, $S_{di} = \langle T_{di}, H_{di} \rangle$ 的时间解耦得到了8个子STN $S_1 \sim S_8$, 分别对应上述8项保障服务, 从子STN中可得到8个独立的子STN作业时间规划, 包括各项作业的最早开始时间、最晚开始时间、最早结束时间和最晚结束时间。由于STN满足时间一致性, 所以各保障部门的作业时间规划合并仍满足机场全局多航班作业任务。

综合STN任务模型的时间和资源约束, 利用时间解耦和最短路径矩阵求解, 并对上述结果进行修正调整, 得到大连机场考虑实际资源的各保障环节协同作业时间规划。将上述航班过站保障甘特图通过三维结果显示, 如图6所示。其中 x 轴表示作

业的可执行时间范围, y 轴表示各保障环节的开始作业时间点和结束作业时间点, z 轴表示过站的航班。

5.3 结果分析

为了对模型的准确度和适用情况进行评价, 将飞机除冰和加油2个典型保障节点的时间规划进行对比分析, 分别将大连机场实际保障时间数据和调整后考虑该机场资源的STN任务模型结果进行对比, 除冰作业和加油作业保障时间调整后情况如表8所示。根据仿真结果和实际数据比较可知, 考虑机场资源的STN任务模型能够明显减少保障节点的规划时间。除冰和加油车辆的总服务时间分别减少了7.1%和7.3%。结果表明, 考虑机场实际资源, 利用STN任务模型对机场保障时间进行规划, 可以减少过站保障时间资源的占用, 起到优化航班过站保障时间、提高过站保障效率和减少航班延误等作用。

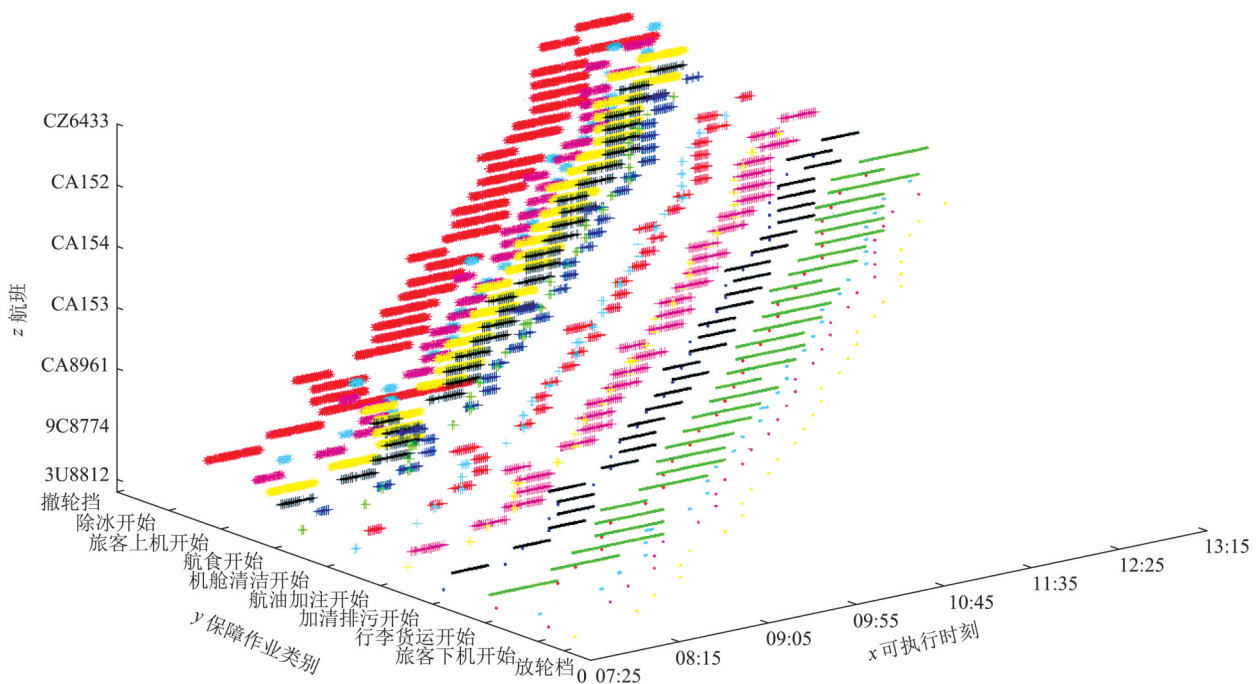


图6 调整后的机场过站保障时间协同规划结果

Fig. 6 Coordinated planning results of Dalian Airport transit support time after adjustment

表8 部分除冰和加油作业时间规划
Table 8 Schedule of deicing and refueling operations

作业类别	CA8953	CA152	CA8907
	B738/Q13	ERJ190/Q15	A321/Q18
除冰调整前 EET	10:36	10:41	10:46
除冰调整前 LET	11:17	11:22	11:27
除冰调整后 EET	10:36	10:41	10:46
除冰调整后 LET	11:12	11:22	11:27
加油调整前 EET	10:10	10:15	10:20
加油调整前 LET	10:47	10:52	10:57
加油调整后 EET	10:10	10:15	10:20
加油调整后 LET	10:40	10:52	10:57

注: CA*为航班; */*为机型和机位

6 结论

本文面对机场运行实际,研究了机场资源受限下航班过站保障时间协同规划问题。基于STN理论,建立了资源和时间约束下的航班过站保障时间规划模型,并利用时间解耦方法和最短距离矩阵求解得到面向机场实际的航班过站保障时间协同规划结果。得出结论如下:

(1) 针对复杂的航班过站保障时间和资源约束问题,综合分析航班过站保障作业流程与时间的定性和定量约束关系,建立了基于时间与资源约束的保障作业时间协同规划模型,并用STN距离图对上述建模过程进行表达。

(2) 利用TDP方法将复杂的机场多航班STN转化为多个独立的子STNs,简化了STN模型。通过求解距离图中的最短路径矩阵,得到了各保障部门对该航班各保障节点作业时间的规划。实现了面向机场实际考虑资源的航班过站保障时间协同规划。

参考文献:

[1] 尹嘉男,胡明华,彭瑛,等. 相关进近模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. 航空学报, 2014, 35(11): 3064-3073.
Yin Jianan, Hu Minghua, Peng Ying, et al. Optimized Method for Multi-Runway Spatio-Temporal Resource Scheduling in Mode of Dependent Approaches [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3064-3073.

[2] 樊玮, 吴建波, 衡红军. 基于多Agent的机场地面服务车辆调度方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(10): 256-259, 272.
Fan Wei, Wu Jianbo, Heng Hongjun. Research on Multi-Agent Based Dispatching Method for Airport Ground Service Vehicles [J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(10): 256-259, 272.

[3] 何丹妮. 大型机场航班过站地面服务车辆调度问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
He Danni. Research on Scheduling of Ground Service Vehicles for Large Airport Airside Transition-Illustrated by the Case of Ferry Bus [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[4] Hunsberger L. Algorithms for a Temporal Decoupling Problem in Multi-Agent Planning[C]//Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence(AAAI-2002). American Association for Artificial Intelligence, 2002: 468-475.

[5] 王青召. 面向繁忙机场多场景的停机位分配优化研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
Wang Qingzhao. Research on Optimization of Multi-Scenario Gate Assignment in Busy Airports[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.

[6] 陈焯. 基于容量动态评估的机场地服保障车辆排班优化与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Chen Ye. Scheduling Optimization and Application of Ground Service Support'S Vehicles in Airport Based on Capacity Dynamic Evaluation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[7] 许晨晨, 邵荃. 不确定作业时间下机场地面服务保障设备调度优化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 372-378.
Xu Chenchen, Shao Quan. Optimization of Airport Ground Service Support Equipment Scheduling under Uncertain Operation Time[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 372-378.

[8] Du J Y, Brunner J O, Kolisch R. Planning Towing Processes at Airports More Efficiently[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (S1366-5545), 2014, 70: 293-304.

[9] 何光勤, 罗凤娥, 马志刚. 签派程序与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004: 17-25.
He Guangqin, Luo Fenge, Ma Zhigang. Dispatch Procedure and Method[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2004: 17-25.

[10] 陶婧婧. 机坪保障服务设备调度仿真与优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Tao Jingjing. Simulation and Optimization of Ground Service Equipment Scheduling at Airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

- 2011.
- [11] Padrón S, Guimarans D, Ramos J J, et al. A Bi-Objective Approach for Scheduling Ground-Handling Vehicles in Airports[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2016, 71: 34-53.
- [12] 邢志伟, 唐云霄. 枢纽机场航班保障服务时间估计[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(11): 2856-2864.
Xing Zhiwei, Tang Yunxiao. Flight Support Service Time Estimation of Hub Airport[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(11): 2856-2864.
- [13] 王秦辉, 陈恩红, 王煦法. 分布式约束满足问题研究及其进展[J]. *软件学报*, 2006, 17(10): 2029-2039.
Wang Qinhui, Chen Enhong, Wang Xufa. Research and Development of Distributed Constraint Satisfaction Problems[J]. *Journal of Software*, 2006, 17(10): 2029-2039.
- [14] 张华, 刘强. 多任务时间规划冲突检测方法[J]. *指挥控制与仿真*, 2014, 36(2): 123-126.
Zhang Hua, Liu Qiang. Conflict Detection Method for Time Planning of Multiple Combat Missions[J]. *Command Control & Simulation*, 2014, 36(2): 123-126.
- [15] 郑洁, 高剑明. 机场地面作业调度问题研究[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2008, 24(6): 60-62.
Zheng Jie, Gao Jianming. Research on Problem of Airport Ground Services Scheduling[J]. *Journal of Hebei North University (Natural Science Edition)*, 2008, 24(6): 60-62.
- [16] 富月, 李婧怡. 线性多变量系统有限时间最优解耦控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(12): 2271-2274.
Fu Yue, Li Jingyi. Finite-time Optimal Decoupling Control for Linear Multi-Variable Systems[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2271-2274.
- [17] 李远, 彭辉, 沈林成. 协同任务规划中基于约束满足的资源冲突检测与消解[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(4): 868-873.
Li Yuan, Peng Hui, Shen Lincheng. Constraint Satisfaction Based Resource Conflicts Detection and Resolution in Collaborative Mission Planning[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 868-873.