

5-22-2023

## Auxiliary Decision-Making Method for Flight Support Force Allocation Based on DBN

Junyang Liu

*1. Postgraduate Brigade, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China,; 1746618275@qq.com*

Shisong Zhu

*2. Flight Support and Command Department, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China,; zhushisong@souhu.com*

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.

---

# Auxiliary Decision-Making Method for Flight Support Force Allocation Based on DBN

## Abstract

**Abstract:** In order to make up for the deficiency of decision-making methods of full deployment and proportional allocation in airport flight support activities, *an auxiliary decision-making model for airport flight support force allocation based on a dynamic Bayesian network (DBN) is constructed.* On the basis of quantifying the strength of the support force, *the hidden Markov model and Hausdorff distance algorithm are introduced* to make auxiliary decisions for flight support activities under different conditions and define relevant decision evaluation indexes as the basis for model verification. Simulation tests are carried out on airport flight support activities under two conditions respectively. The results show that the decision-making model can generate a scheme whose index is better than the traditional proportional allocation scheme and provide the basis for decision-making support for supplementing the support force gap.

## Keywords

flight support, dynamic Bayesian network (DBN), hidden Markov model, Hausdorff distance, force allocation, auxiliary decision

## Recommended Citation

Junyang Liu, Shisong Zhu. Auxiliary Decision-Making Method for Flight Support Force Allocation Based on DBN[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1008-1019.

## 基于 DBN 的飞行保障力量配置辅助决策方法

刘君阳<sup>1</sup>, 朱世松<sup>2\*</sup>

(1. 空军勤务学院 研究生大队, 江苏 徐州 221000; 2. 空军勤务学院 飞行保障指挥系, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 为弥补机场飞行保障活动中全员出动和比例配置决策方法的不足, 构建了基于动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)的机场飞行保障力量配置辅助决策模型。在量化保障力量强度的基础上引入隐马尔可夫模型和Hausdorff距离算法, 对不同条件下的飞行保障活动进行辅助决策, 并定义相关决策评估指标作为模型验证依据。分别对两种情况的机场飞行保障活动进行仿真试验, 结果表明, 通过决策模型可以生成指标优于传统比例配置的方案, 并且可对保障力量缺口补充提供决策支持依据。

**关键词:** 飞行保障; 动态贝叶斯网络; 隐马尔可夫模型; Hausdorff距离; 力量配置; 辅助决策

中图分类号: TP391.9; E91 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)05-1008-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0037

**引用格式:** 刘君阳, 朱世松. 基于DBN的飞行保障力量配置辅助决策方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 1008-1019.

**Reference format:** Liu Junyang, Zhu Shisong. Auxiliary Decision-Making Method for Flight Support Force Allocation Based on DBN[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 1008-1019.

## Auxiliary Decision-Making Method for Flight Support Force Allocation Based on DBN

Liu Junyang<sup>1</sup>, Zhu Shisong<sup>2\*</sup>

(1. Postgraduate Brigade, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China;

2. Flight Support and Command Department, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** In order to make up for the deficiency of decision-making methods of full deployment and proportional allocation in airport flight support activities, an auxiliary decision-making model for airport flight support force allocation based on a dynamic Bayesian network (DBN) is constructed. On the basis of quantifying the strength of the support force, the hidden Markov model and Hausdorff distance algorithm are introduced to make auxiliary decisions for flight support activities under different conditions and define relevant decision evaluation indexes as the basis for model verification. Simulation tests are carried out on airport flight support activities under two conditions respectively. The results show that the decision-making model can generate a scheme whose index is better than the traditional proportional allocation scheme and provide the basis for decision-making support for supplementing the support force gap.

**Keywords:** flight support; dynamic Bayesian network (DBN); hidden Markov model; Hausdorff distance; force allocation; auxiliary decision

## 0 引言

机场飞行保障是指机场飞行后勤保障、装备

技术保障和战斗勤务保障, 主要包括航管气象、通信导航、航材四站、机营场务、物资保障、医

收稿日期: 2022-01-14 修回日期: 2022-03-21

基金项目: 军内科研重点项目(BKJ19C025)

第一作者: 刘君阳(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为军队后勤指挥控制与技术。E-mail: 1746618275@qq.com

通讯作者: 朱世松(1974-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为后勤管理信息化。E-mail: zhushisong@souhu.com

疗财务等保障任务,大体可以分为与飞行强度直接相关、不直接相关及与外场人员数量相关三大类。其中与飞机直接相关的保障任务主要包括飞机牵引、加油、充气、装挂武器弹药等与飞机出动强度有相关关系的工作;与飞机不直接相关的保障任务主要是指场道、驱鸟、气象、通信、导航等具有固定任务量的工作;与外场人员数量相关的保障任务主要是物资供应和卫勤保障等工作。机场飞行保障力量配置辅助决策是指为完成某场次飞行保障任务,在保障任务分队编制、保障装备数量、保障业务逻辑、保障时限等要求,通过科学制订保障人员和保障装备的数量配置方案,尽可能提高保障效能、降低保障成本的行为。如何经济合理地组织使用场站保障力量,快速实施各项勤务保障,使用最少的人力物力,在最短时间内完成飞行前和再次出动准备,确保飞机及时升空作战、机动,是对飞行保障的总要求。在大规模、高强度的持续飞行保障活动中,保障力量配置问题倍受重视。以往决策方法通常按比例配置,相对粗放,往往存在较大冗余,加之保障实施阶段全员进场、全程在场,形成保障资源浪费问题较为突出。因此,研究科学高效的飞行保障力量配置辅助决策方法具有十分重要的现实意义。文献[1-3]明确飞行保障活动属于离散事件系统,同时还建立了相关的飞行保障活动模型。可以发现,这些模型中各保障活动之间存在着复杂的串并行关系,使得保障力量配置问题成为了既定约束条件下的一类大规模NP-Hard问题<sup>[4]</sup>。对该问题的解决方法有排队模型<sup>[5]</sup>、数量估算<sup>[6]</sup>、数学规划<sup>[7-8]</sup>、智能优化<sup>[9-11]</sup>等方法。鉴于智能优化方法中贝叶斯网络<sup>[12-13]</sup>对于具有串并行流程且关系相互独立的离散任务集合问题处理效果较好,同时,考虑机场飞行及其保障活动非线性动态特征较为突出,结合文献[14]研究成果,本文提出基于DBN(dynamic Bayesian network)的机场飞行保障力量配置辅助决策方法,用以解决传统决策模型动态掌控能力较差的问题。

## 1 飞行保障力量配置辅助决策模型

### 1.1 模型构建思路

飞行保障活动一般由受领飞行任务-明确保障任务-制定数量计划3个步骤组成。在受领飞行任务后,根据飞行器型号能够确定本次保障需要出动的人员、装备类别,明确保障任务需求。保障计划的制定在时间上需服从飞行时间与架次、数量小于本场保障人员与装备数量编制并且整体流程不超过保障任务时间上限,以上即该模型的约束条件。模型应在该条件下实现保障力量的合理分配,即在满足飞行保障任务需求的前提下,通过降低保障人员和保障装备出动数量,提高保障力量的利用率。因此模型构建的主要思路为:

(1) 根据规定的保障任务流程,制定飞行保障活动流程的动态贝叶斯网络模型。将各保障任务定义为相互独立的父节点 $R$ ,任务对应具体业务作为对应的子节点 $r$ ,节点之间的推进方式为:先由后节点提供力量需求,等待前节点完成业务后从资源池提取对应力量对节点需求进行满足,实现保障活动流程的推进。

(2) 结合活动流程网络,在外部构建决策模型实现决策行为。以保障人装编制数量、保障业务消耗时间期望值为决策变量,保障力量出动强度为自变量。通过改变节点需求量实现各节点保障力量强度的调整。

(3) 通过分析评价指标实现推演循环,并在两种不同任务负荷状态下分别利用隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)和Hausdorff距离算法模型实现对应需求的辅助决策行为。

结合以上思路,建立如图1所示决策活动模型。

图1中,保障活动DBN网络由车辆交通、场务、油料、四站、军需、航材、通导卫警和特种勤务等8个父节点 $R$ 组成,并由各自对应任务流程的子节点 $r$ 和连接部分为飞行保障力量辅助决策模

型中的离散单流程BN(bayesian network), 通过保障流程将不同时刻的单流程BN相连接即可组成飞行保障流程DBN网络。网络中全程并行流程之间

相互离散独立, 互不干扰。但同流程下某些并行节点的活动需要依据保障规定进行。各节点内容如表1所示。

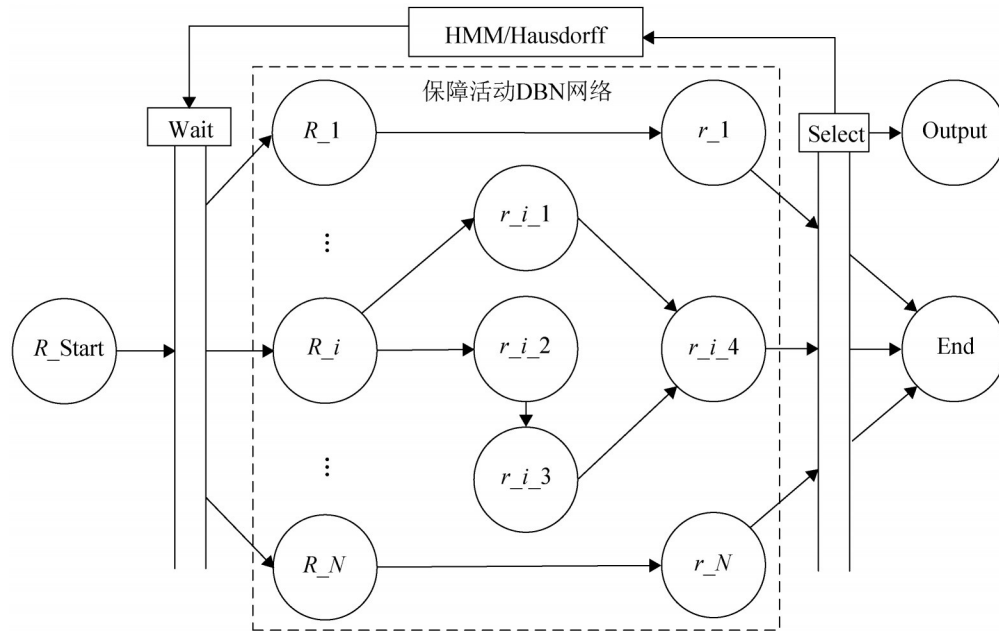


图1 基于DBN的飞行保障力量配置辅助决策概念模型

Fig. 1 Conceptual model of auxiliary decision-making for flight support force allocation based on DBN

在网络基础上构建辅助决策模型, 其基本决策行为可表示为:

(1) 活动开始后, 设定保障作业时长、保障需求指标及相关系数, 进行保障力量强度的量化。量化完成后进入Wait(任务等待)状态。

(2) 得到保障任务后Wait状态解除, 模型进入方案分析环节, 方案为保障人员、装备出动数量方案, 即各专业保障人员、保障车辆及伞、灶、灯光电等装备出动数量的计划。设定初始方案为全员出动进场方案, 模型以保障力量编制数量上限为输入, 由该方案确定节点保障力量初始需求, 并以此更新父节点与子节点间力量强度量化值。当到达进程环节Select时, 依据目标路径状态选择进程: ①进入决策方案择优更新进程; ②进入决策择优终止进程; ③择优行为终止后可选择继续降低力量强度返回网络。

(3) 在方案择优进程中, 采用隐马尔可夫模型

建立推演行为, 推演更新目标路径状态, 并按照既定约束条件, 将保障力量强度更新值返回网络。此外为描述择优内部行为, 每次仅更新一个节点和连接线的状态。

(4) 为贴近任务实际情况, 在(2)、(3)的流程基础上设定满负荷状态下决策流程, 利用网络模型分别更新任务需求保障力量强度和饱和路径状态保障力量强度, 通过Hausdorff距离计算保障力量强度的暂态差异度, 以此作为证据源, 为力量补充提供判别依据。

(5) 根据网络更新规则, DBN网络节点及节点间状态每更新一次, 就执行一次Output进程, 将方案及其决策评价指标进行输出, 用作决策效能对比。最终得到结果为: ①理想约束条件下历次数量配置方案、方案对应保障力量强度及评价指标; ②满负荷约束条件下各节点间保障力量强度差值及距离 $H$ 。



表1 保障活动DBN网络节点信息  
Table 1 DBN network node information of support activities

父节点R	职能	子节点r	业务	父节点R	职能	子节点r	业务		
1	运输	1	指挥车保障	5	军需伙食	1	飞行灶保障		
		2	空勤车保障			2	地面灶保障		
		3	机务车保障			3	大灶(设施)保障		
		4	牵引车保障			4	保障(员)		
1	养场(员)	5	供水(车)保障						
2	机场勤务	2	机场灯光	6	航材	1	保管人员		
		3	消防保障			2	下送(车)保障		
		4	场道清扫(车)			3	救生伞保障		
		5	驱鸟(车)保障			4	阻力伞保障		
		6	洒水(车)保障	1	气象预报(员)				
		7	助航灯(器材)保障	2	通信指挥(车)				
		8	特情抢救(车)保障	3	飞管(塔台)车				
		9	驱鸟(员)	4	内场灯光(车)保障				
		3	油料	1	加油(车)保障	7	通导卫警	5	医护保障(员)
2	抽油(车)保障			6	救护保障(员)				
3	运油(车)保障			7	飞行岗				
4	油料化验(员)			8	警戒岗				
5	附油(车)保障			1	A型弹保障				
6	油料回收(车)			2	B型弹保障				
4	四站	1	充冷(车)保障	8	特种勤务			3	C型弹保障
		2	充氮(车)保障					4	下送(车)保障
		3	电源(车)保障			5	弹药I		
		4	油泵(车)保障			6	弹药II		
		5	空调(车)保障			7	弹药III		
		6	充氧(车)保障			8	运输(车)保障		
		7	气源(车)保障						
		8	液冷(车)保障						
		9	高氮(车)保障						

## 1.2 保障力量强度量化方法

机场遂行保障活动的保障力量强度量化是构建飞行保障力量配置辅助决策模型的关键,是保障力量执行任务能力的数学表达。通过量化方法,使保障力量能够使用数学方法进行分析,参与决策模型构建。

定义某一保障流程 $\alpha$ 中节点 $j$ 的力量强度为

$$q_j^\alpha = \lambda_j^\alpha B_j^\alpha \quad j=1, 2, \dots, n_\alpha, \alpha=1, 2, \dots, N$$

式中:  $\lambda_j^\alpha$ 为流程 $\alpha$ 中节点 $j$ 的保障力量强度;  $B_j^\alpha$ 为各专业保障力量在流程 $\alpha$ 内各节点的独立工作

时长(min);  $n_\alpha$ 为流程 $\alpha$ 中节点数目;  $N$ 为流程数量。

定义节点保障力量需求度为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^{n_\alpha} q_{ij}^\alpha d_{ij}^\alpha}{\sum_{i=1}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^{n_\alpha} q_{ij}^\alpha}$$

式中:  $q_{ij}^\alpha$ 为该流程下节点 $i, j$ 间的力量强度;  $d_{ij}^\alpha$ 为 $i$ 到 $j$ 的保障力量最低需求强度(人装数量)。

采用车流平衡约束思想<sup>[15-16]</sup>反推保障力量强度 $\lambda$ ,引入强度量化矩阵行、列约束系数,对构建的模型进行双重约束,流程 $\alpha$ 下力量强度量化矩阵

的约束系数计算表达式为

$$\begin{cases} \mu_i = \left[ \sum_j X_j f(t) \right]^{-1} \\ \mu_j = \left[ \sum_i Y_i f(t_{ij}) \right]^{-1} \end{cases}$$

式中： $\mu_i$ 、 $\mu_j$ 分别为强度量化矩阵的行、列约束系数； $X_j$ 为节点 $j$ 的力量需求量； $Y_i$ 为节点 $i$ 的力量空闲量； $f$ 为阻抗函数。

由此得到节点保障力量强度量化值：

$$\lambda_{1 \times n_a} = \text{diag} [\mu_i \mu_j Y_i X_j f(t_{ij})]$$

按照上述过程能够得到各流程的保障力量强度量化结果。

### 1.3 理想条件下决策模型

#### 1.3.1 推演及决策方法

在得到各保障流程力量强度量化值后，进行保障力量配置辅助决策。假设模型运行状态理想，保障力量编制在全员出动情况下能够在既定时间内保证完成预期保障任务。

首先对飞行保障活动模型进行推演行为的构建。目前对具有时间属性的 DBN 模型主要有 Boyen-Koller 算法、隐马尔可夫模型、FCM 模糊聚类算法等。考虑到保障活动中节点作业独立性与时间分布动态性情况，结合 DBN 模型构建思路中需要对各节点进行需求强度调整的需求，本文使用隐马尔可夫模型<sup>[17]</sup>。将 DBN 活动模型转化为因子 HMM 模型进行推理。

定义 DBN 网络某一时刻  $T$  时父节点为观测节点  $[R_{1T}, R_{2T}, \dots, R_{NT}]$ ， $R_{iT}$  状态通过子节点  $r$  体现，定义为  $r \in [r_{i1T}, r_{i2T}, \dots, r_{inT}]$ ，依据隐马尔可夫模型原理引入隐藏节点，与该时刻观测节点组成的 BN 网络对应组成隐藏 BN，将该隐藏 BN 节点定义为  $[S_{1T}, S_{2T}, \dots, S_{NT}]$ ， $S_{iT}$  状态记为  $q$ ， $q \in [q_{i1T}, q_{i2T}, \dots, q_{inT}]$ 。隐藏节点设置时需要明确其时间属性， $S_{iT}$  节点状态信息仅与模

型时间计量单位前一时刻 ( $T-1$  时刻) 节点状态相关。

参数界定方面，飞行保障活动 DBN 模型状态层链数为  $N$ ，其转换后的 HMM 转移矩阵可以通过原状态链中各层转移矩阵相乘得到，特征分布也由原状态链中各层特征分布相乘得到。因此对于  $N > 1$  的因子 HMM 模型同样可运用基本的前后向算法解决推理问题。

常见 DBN 问题中的计算目标结果为

$$P(X[t]=x[t]|Y[1]=y[1], Y[2]=y[2], \dots, Y[T]=y[T])$$

当转化 HMM 模型后，计算流程如下：

(1) 初始化

$$\alpha_t^{\text{DBN}}(i) = \pi_i b_i(y_T)$$

$$\beta_t^{\text{DBN}}(i) = 1$$

(2) 迭代

$$\alpha_t^{\text{DBN}}(i) = \sum_j \alpha_{t-1}^{\text{DBN}}(j) \times a_{ji} \times b_i(y[t])$$

$$\beta_T^{\text{DBN}}(i) = \sum_j \beta_{T-1}^{\text{DBN}}(j) \times a_{ji} \times b_i(y[t])$$

(3) 求解

$$\Gamma_t^{\text{DBN}} = \frac{\alpha_t^{\text{DBN}}(i) \beta_T^{\text{DBN}}(i)}{\sum_i \alpha_t^{\text{DBN}}(i) \beta_T^{\text{DBN}}(i)}$$

根据推演行为模型明确时刻  $T$  各节点状态条件概率及期望值后，假设 DBN 模型中流程  $i$  的第  $j$  个保障节点在时刻  $T$  的状态为： $Q_{ij}|T=T_0$ ，根据节点当前状态与设定需求量对保障活动中的各保障进程的状态进行推理，对每条路径中时刻  $T+1$  进行迭代，最终得到所有路径中时刻  $T+1$  目标路径状态集合为

$$K_{t \leq t_p} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_a} \Gamma_{ij} \int_0^{Q_{ij}} t_{ij}(\rho) d\rho$$

式中： $t_{ij}(\rho)$ 为对应节点保障强度密度为  $\rho$  时的保障力量进行活动的时间。其意义为：对确定流程的保障任务，运用更少的力量就能够在任务规定时间上限  $t_p$  内完成相同保障任务，相对应的支援和应急力量就能更加充裕，保障能够实现更高的效能。保障强度密度定义为单位时间内的保障力

量强度, 即

$$\rho_i = \sum_{j=1}^{n_a} \varepsilon_{ij} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial t}$$

式中:  $\varepsilon \in \{0, 1\}$ , 属于判断系数, 主要取决于对应节点的保障任务目标。

完成推演活动后, 为实现最优方案选择, 以  $\min K$  为目标函数, 制定约束条件为

$$\begin{cases} t_0, \sum_g u(\gamma)_g^{rs} = 0 \\ t_1, \sum_g u(\gamma)_g^{rs} > 0 \\ u(\gamma)_g^{rs} \geq 0 \\ \bar{S} = u(\gamma)_g^{rs} \beta_{ij}^{rs} \end{cases}$$

式中:  $u(\gamma)_g^{rs}$  为流程  $(r, s)$  上贝叶斯网络节点  $g$  的最佳变分近似值; 当  $\sum_g u(\gamma)_g^{rs} = 0$  时, 保障时间最短为  $t_0$ ; 当  $\sum_g u(\gamma)_g^{rs} > 0$  时, 保障时间为  $t_1$ ;  $\bar{S}$  为平均时间需求量;  $\beta_{ij}^{rs}$  为指示性变量<sup>[18]</sup>。

保障强度密度约束条件的拉格朗日方程为

$$D(\bar{u}, \bar{k}) = F(\bar{S}(\bar{u})) + \sum_{rs} \left( k - \sum_g u(\gamma)_g^{rs} \right)$$

式中:  $D(\bar{u}, \bar{k})$  为拉格朗日函数,  $F(\bar{S}(\bar{u}))$  为阻抗函数,  $k$  为留守恒约束的拉格朗日乘子。得到目标函数并取微分得到相应力量强度最优解  $q_{\min}$ , 完成力量配置方案制定。至此, 理想约束条件下的飞行保障力量配置辅助决策行为完成。

### 1.3.2 相关决策效果评价指标

为分析模型网络状态, 将目标路径状态函数标准化, 定义网络评价指标—标准化目标路径状态为

$$K' = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_a} \Gamma_{ij} \int_0^{Q_{ij}} t_{ij}(\rho) d\rho \Big|_{t \leq t_p}}{\int_0^{t_p} \sum \varepsilon \frac{\partial Q}{\partial t} dt}$$

式中: 分子为目标路径状态集合函数, 分母为最大出动条件下, 保障力量工作到任务时间上限所实现的保障力量强度释放量。

为分析保障主体参与保障活动的强度, 定义保障力量出动率为

$$G' = \frac{e_{ai} t_{\text{sup}}(\alpha i)}{E_{ai} T_{\text{sup}}(\alpha i)} \times 100\%$$

$$G = \sum_{\alpha=1}^N \mu_{\alpha} \sum_{i=1}^{n_a} G' \times 100\%$$

式中:  $G'$  为单节点保障力量出动率;  $G$  为方案整体保障力量出动率;  $\mu_{\alpha}$  为流程  $\alpha$  的任务需求系数,  $N$  为保障流程数;  $n_a$  为流程  $\alpha$  节点数量;  $e_{ai}$  为节点人装出动调拨数量;  $t_{\text{sup}}(\alpha i)$  为对应人装参与保障活动的时间函数;  $E_{ai}$  为  $e_{ai}$  对应人装编制上限;  $T_{\text{sup}}(\alpha i)$  为该单位保障活动的时间函数。

为分析保障物资和时间需求的满足程度, 定义单流程任务满足率和整体任务满足率分别为

$$Z'_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_a} (N_{\text{mat}} T_{\text{ned}})_{ak}}{\sum_{k=1}^{n_a} (S_{\text{pos}} T_{\text{exp}})_{ak}} \times 100\%$$

$$Z = \frac{\sum_{\alpha=1}^N Z'_i}{N} \times 100\%$$

式中:  $N_{\text{mat}}$  为物资需求数量;  $T_{\text{ned}}$  为节点作业需求时间;  $S_{\text{pos}}$  为物资实际配置数量;  $T_{\text{exp}}$  为节点作业实际时间期望;  $n_a$  为流程  $\alpha$  节点数量;  $N$  为保障流程数。

## 1.4 满负荷条件下决策模型

为保证模型制定符合实际情况, 制定满负荷条件下决策方法, 对场站飞行保障力量建设进行指引。与前面理想条件作为对比, 在飞行保障力量编制相同情况下, 当处于高强度任务状态时, 由于场站飞行保障力量强度存在极值, 导致  $q'_{\max} \leq q_{\min}$ , 其中:  $q'_{\max}$  为实际最大保障力量强度;  $q_{\min}$  为任务需求最低保障力量强度。该状态下的特点为目标路径状态饱和, 即  $K$  为确定值, 相应各流程力量强度  $q_{\alpha}$  也确定, 但保障时间不能满足任务要求。为达成保障目标, 需要在保障效率确定的条件下加强保障力量, 此时决策重心应由配置方案择优转移至力量补充方案的制定。



首先根据 $K$ 值确定各节点任务需求最低保障力量强度 $q_{\min}$ ，定义其集合为 $\mathbf{Q}_{\min}$ ，根据编制情况确定各节点实际最大保障力量强度 $q'_{\max}$ ，定义其集合为 $\mathbf{Q}_{\max}$ ，由于存在 $q'_{\max} \leq q_{\min}$ ，故集合 $\mathbf{Q}_{\max}$ 必为集合 $\mathbf{Q}_{\min}$ 的一个子集。将Hausdorff距离算法<sup>[19]</sup>思想引入过负荷约束条件下保障力量缺口补充过程，利用Hausdorff距离算法反映保障力量强度值差距大小并作为保障力量加强的独立证据源。

Hausdorff距离算法为

$$H(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}) = \max(h(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}), h(\mathbf{Q}_{\max}, \mathbf{Q}_{\min}))$$

其中：

$$h(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}) = \max_{\alpha_i \in \mathbf{Q}_{\min}} \min_{b_j \in \mathbf{Q}_{\max}} |\alpha_i - b_j|$$

$$h(\mathbf{Q}_{\max}, \mathbf{Q}_{\min}) = \max_{b_j \in \mathbf{Q}_{\max}} \min_{\alpha_i \in \mathbf{Q}_{\min}} |b_j - \alpha_i|$$

式中： $|\alpha_i - b_j|$ 表示集合 $\mathbf{Q}_{\min}$ 中元素 $\alpha_i$ 与 $\mathbf{Q}_{\max}$ 中元素 $b_j$ 的距离，取最大值称集合 $\mathbf{Q}_{\min} \rightarrow \mathbf{Q}_{\max}$ 的单向Hausdorff距离。集合最大不匹配程度可通过最大单向Hausdorff距离 $h$ 得到集合 $\mathbf{Q}_{\min}$ 与 $\mathbf{Q}_{\max}$ 间的双向Hausdorff距离 $H(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max})$ 体现。

在飞行保障活动中，由于保障流程固定，仅需考虑两集合同位元素的距离，故定义过负荷约束条件下保障力量强度补充的参考集为距离集为

$$H'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}) = \left[ h_1'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}), h_2'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}), \dots, h_{n_a}'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}) \right]$$

式中： $h_{n_a}'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_2)$ 为流程 $\alpha$ 中节点 $n_a$ 的保障力量强度距离(力量强度暂态差异度)：

$$h_{n_a}'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max}) = \left[ \max_{\alpha_i \in \mathbf{Q}_{\min}} \min_{b_i \in \mathbf{Q}_{\max}} |\alpha_i - b_i| \right]$$

将距离集元素排序可对各节点保障力量需求程度进行判断。

## 2 保障力量配置辅助决策模型验证

### 2.1 决策推演行为验证

以某场站保障某战备拉动空运、空技、空降

的任务为例，飞行任务为单次出动I型飞机10架、II型飞机2架，以进场时刻为时间刻度原点，保障任务时间上限为120 min。定义全员出动配置方案为保障力量配置初始方案，即方案1；依据本次任务机型选取对应保障分队与装备物资，将输入父节点的各保障力量出动强度设定为最大(各分队全员出动，达到保障力量强度约束条件上限)，并设置相应任务时长为

$$\mathbf{Q}_1^T = \begin{bmatrix} 0.56 & 1.60 & 3.93 & 2.24 & 0.86 & 0.53 & 0.56 & 2.14 & 0 \\ 2.24 & 0.53 & 2.34 & 2.24 & 0.83 & 0.53 & 0.56 & 3.21 & 0 \\ 2.24 & 0.56 & 1.17 & 2.24 & 4.33 & 8.57 & 0.56 & 5.35 & 0 \\ 2.80 & 1.60 & 1.17 & 0.56 & 1.30 & 8.57 & 0.56 & 0.53 & 0 \\ 0 & 1.60 & 1.17 & 3.36 & 0.43 & 0 & 3.36 & 3.36 & 0 \\ 0 & 1.60 & 1.17 & 3.36 & 0 & 0 & 0.56 & 1.12 & 0 \\ 0 & 0.53 & 0 & 3.36 & 0 & 0 & 1.12 & 4.48 & 0 \\ 0 & 0.53 & 0 & 3.36 & 0 & 0 & 2.80 & 2.24 & 0 \\ 0 & 0.54 & 0 & 3.36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

决策择优更新阶段，设定节点状态条件概率矩阵为

$$(\mathbf{I}^{\text{DBN}})^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.8 & 0.75 & 1 & 0.62 & 1 & 1 & 0 \\ 0.75 & 1 & 0.5 & 0.75 & 1 & 0.62 & 1 & 1 & 0 \\ 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 0.8 & 0.62 & 1 & 1 & 0 \\ 0.6 & 0.66 & 0.45 & 1 & 0.66 & 0.62 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0.66 & 0.91 & 0.66 & 1 & 0 & 0.66 & 1 & 0 \\ 0 & 0.66 & 0 & 0.83 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.83 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.66 & 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过模型完成该条件下最优方案推演，根据保障出动率-父节点顺序-子节点顺序的优先级，保持节点任务量和各人员、装备的个体作业效率不变，以各保障力量的单位数量为步进降低节点需求量，将历次方案进行输出并对方案进行评价。

定义方案消耗时间 $t_i$ 与任务要求时间上限 $t_p$ 比值为流程相对时间：

$$t' = t_i / t_p$$

根据该比值定义方法，方案选取范围为 $t' \leq 1$ 。

汇总多次指标评价值、保障出动率及保障满足率数据，得到如图2所示的方案指标变化情况。

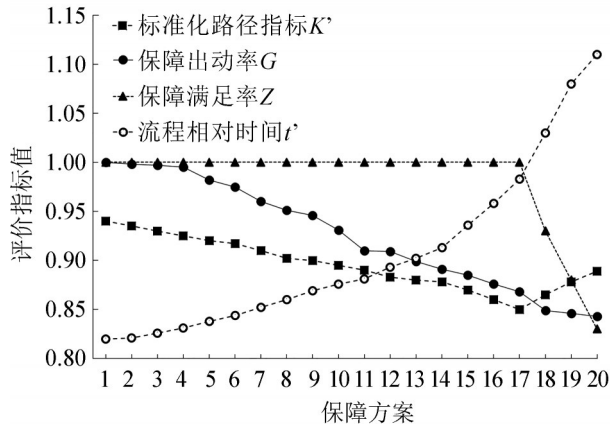


图2 方案指标变化曲线  
Fig. 2 Change curve of scheme index

对指标变化情况进行分析, 首先筛选所有流程相对时间小于1的方案, 得到方案1~17。之后随着节点力量需求量的步进下降, 根据目标函数定义, 发现方案17评估指标满足任务时限要求下最低保障出动强度, 并且。当得到方案17之后继续减少节点力量需求量时, 可以发现在等任务强度条件下, 由于节点力量需求量的降低, 该节点需要的作业时间增加, 进而导致保障活动整体需求时间增加, 使得目标路径偏离最优状态, 模型

整体需求时间超出任务要求限制。此时可以确定迭代已达到最优状态, 决策模型推演最优判定条件无误, 评价指标有效, 故选取方案17为本次保障活动的力量配置方案。该方案保障出动率为86.8%、保障任务满足率为100%、标准化目标路径状态  $K'=0.85$ , 各节点保障力量强度为

$$Q_{17} = \begin{bmatrix} 0.56 & 1.60 & 2.34 & 1.68 & 0.86 & 0.33 & 0.56 & 2.14 \\ 1.68 & 0.53 & 1.17 & 1.68 & 0.86 & 0.33 & 0.56 & 3.21 \\ 1.12 & 0.53 & 1.17 & 1.12 & 3.46 & 5.30 & 0.56 & 5.35 \\ 1.68 & 1.07 & 0.53 & 0.56 & 0.86 & 5.30 & 0.56 & 0.53 \\ 0 & 1.07 & 1.07 & 2.24 & 0.43 & 0 & 2.24 & 3.36 \\ 0 & 1.07 & 1.07 & 2.80 & 0 & 0 & 0.56 & 1.12 \\ 0 & 0.53 & 0 & 2.80 & 0 & 0 & 1.12 & 4.48 \\ 0 & 0.53 & 0 & 2.24 & 0 & 0 & 2.80 & 1.12 \\ 0 & 4.28 & 0 & 0.56 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将该方案与初始方案数量配置情况进行对比, 对比情况如图3所示。

根据图3可以看出, 除个别与飞机直接相关的必需物资外, 大部分具有独立业务的保障装备可以依据决策模型输出的最优方案进行配置, 同样能够满足保障任务要求, 并且相比全员出动的配置方式在资源利用情况上能够表现出优化作用。

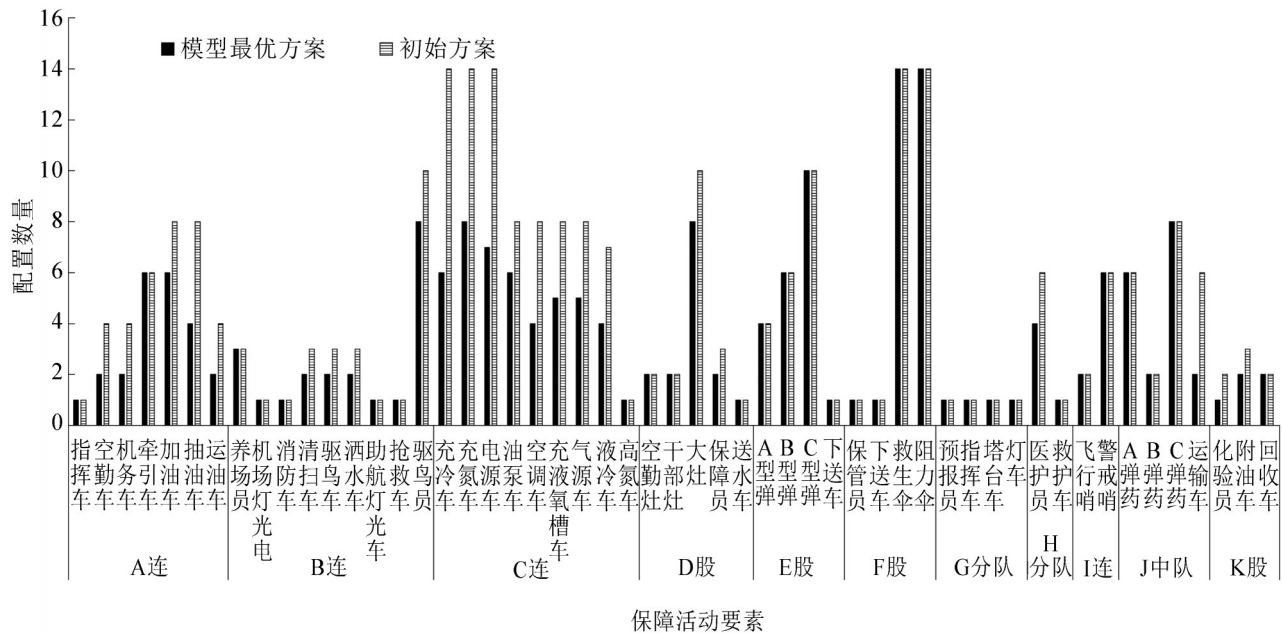


图3 模型最优方案与初始方案对比情况  
Fig. 3 Comparison between optimal scheme of model and initial scheme

### 2.2 理想条件下决策效果验证

为对比本文模型与场站常用的根据飞行任务进行比例调配方案之间效果，在决策模型中输入该场站依据相同飞行任务制定的比例配置方案(如图4所示)：充气、电源车 1:1、充电、加油车 1:2、油料运输及附油车辆 1:4、保障人员及指挥组按照编制配属客车 4 辆，专业车辆 2 辆，以 1:1 进行运行与备份、外场驱鸟以半连编制全程值班，并于进场离场

时刻持续出动、布置飞行警戒哨位 8 个。其余材油、弹、材供应及军需保障根据飞行任务进行调拨。将比例配置方案与初始、模型输出最优方案的评价指标进行对比，情况如表 2 所示。可以看出比例配置方案相较于方案 1，在指标各方面都具有一定优势；但方案 17 对比常用比例配置方案，能够在满足任务条件的要求下实现更低的保障力量出动率，整体配置优化程度较比例配置方案更好。

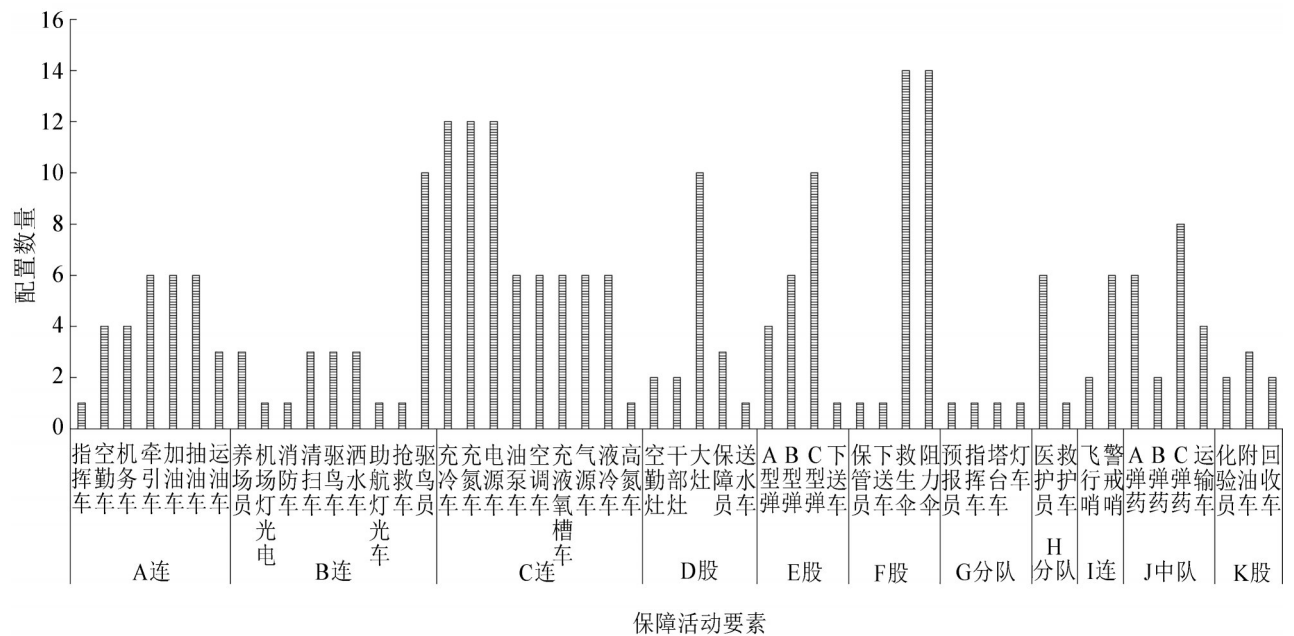


图 4 常用比例系数配置方案  
Fig. 4 Common proportionality coefficient allocation scheme

表 2 理想条件下方案评价指标比较  
Table 2 Comparison of evaluation indexes of schemes under ideal conditions

方案	路径指标 $K'$	出动率 $G$	满足率 $Z$	相对时间 $t'$
初始方案	0.940	1	1	0.820
比例配置方案	0.898	0.928	1	0.869
模型最优方案	0.850	0.868	1	0.983

### 2.3 满负荷条件下决策效果验证

在保障活动流程与资源消耗服从相关分布不变的前提下，提高任务强度，增加 I 型飞机 5 架，II 型飞机 2 架，飞行架次均为 1 架次，再次输入原模型最优方案，通过 Hausdorff 模块计算任务调整

前后各节点的保障力量强度  $H$  距离，通过分节计算验证力量补充方案证据源选择的准确性。

以四站保障活动  $R_4$  为例，在判定模型中力量缺口段距离最终值  $H$  应接近于 0，故可设非缺口节点力量强度理论匹配度  $H_{ST}=1$ ，同时利用整定系数，将判据阈值整定依据理论匹配度按以下原则整定：

$$H_{S,Set} = \frac{H_{ST}}{K_{rel}}$$

式中： $K_{rel}$  固定为 1.25，则  $H_{S,Set}=0.8$ 。

当任务强度改变后，原模型最优方案与现方案各节点力量强度的匹配度为

$$H_{S(o,n)} = \begin{cases} H_S & H_S = 1 - \frac{\min[h_{n_a}'(\mathbf{Q}_{\min}, \mathbf{Q}_{\max})]}{|q_{\min}|n_a} \end{cases}$$

通过比较  $H_{S(o,n)}$  与判据阈值  $H_{S,Set}$  判断节点保障力量是否存在缺失。当  $H_{S(o,n)} > H_{S,Set}$  时, 将该节点看作未超荷状态, 反之则存在力量缺口。

现将力量缺口判定模型的输出结果如表3所示。

表3 力量缺口判定模型输出结果 (R\_4)  
Table 3 Output result of force gap judgment model (R\_4)

父节点R	子节点r	节点力量强度匹配度 $H_{S(o,n)}$									缺口节点
		4_1	4_2	4_3	4_4	4_5	4_6	4_7	4_8	4_9	
	1	0.403 3									r_4_1
	2	0.988 6	0.527 1								r_4_2
	3	0.987 0	0.986 2	0.461 1							r_4_3
	4	0.986 1	0.983 0	0.986 1	0.906 9						-
4	5	0.978 8	0.979 1	0.981 3	0.980 6	0.493 6					r_4_5
	6	0.973 1	0.976 8	0.976 4	0.974 2	0.959 4	0.518 2				r_4_6
	7	0.906 2	0.941 7	0.975 2	0.957 3	0.912 0	0.944 2	0.467 2			r_4_7
	8	0.886 1	0.936 0	0.938 8	0.936 1	0.864 9	0.938 7	0.921 6	0.449 2		r_4_8
	9	0.863 9	0.849 5	0.876 0	0.892 7	0.815 2	0.851 8	0.907 3	0.851 8	0.804 9	-

### 3 结论

本文构建了基于DBN的机场飞行保障力量配置辅助决策模型, 并进行了试验验证。结果表明, 通过模型得到的决策方案相比传统比例配置方案具有优越性, 体现了研究的学术价值。模型的构建综合考虑了保障流程、保障力量编制、保障作业时间等因素, 在此基础上分别进行了理想约束和满负荷约束条件下的不同决策方案制定, 更加贴近现实保障活动需求, 可以为解决飞行保障力量配置提供决策模型支持。

需要注意的是, 本文所述模型主要针对一般性的机场飞行保障力量配置优化问题。不同机场, 其隶属关系、飞行任务和地理环境、装备编制等因素存在差异, 使用中可根据单位实际对具体任务细节差异和装备人员编成实际进行灵活变通和局部微调。另外, 该模型主要以数值数据作为评价期望指标, 对保障活动中的空间轨迹数据及其

根据力量缺口判定结果, 由任务调整后节点力量强度匹配度认定活动R\_4中除节点4、9外均存在保障力量缺口, 应当据此分析缺口力量强度需求值, 并制定相应的补充调控措施。结果表明该模型符合预期计算结果, 能够作为指导完成满负荷条件下力量缺口补充的任务目标需求。

衍生时序数据的影响没有体现。因此下一步还可考虑加入飞机、车辆、人员的行程轨迹、行驶路程时间、空间位置信息等数据作为决策依据, 结合机场具体情况进行更深层次的研究。

### 参考文献:

- [1] 方绍强, 卫克, 陈伟鹏, 等. 基于ARENA的场站飞行保障过程建模与模拟[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 746-750.  
Fang Shaoqiang, Wei Ke, Chen Weipeng, et al. Modeling and Simulation of Station Flight Support Process Based on Arena[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(3): 746-750.
- [2] 方绍强, 卫克, 陈伟鹏, 等. 飞行保障过程中车辆调度建模与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2008, 9(1): 18-21.  
Fang Shaoqiang, Wei Ke, Chen Weipeng, et al. Modeling and Simulation of Vehicle Scheduling in Flight Support [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2008, 9(1): 18-21.
- [3] 蒋晓阳, 陈伟鹏, 方绍强, 等. 应急飞行保障仿真与资源配置优化研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(11): 2610-2613.



- Jiang Xiaoyang, Chen Weipeng, Fang Shaoqiang, Zhao Shanghong. Research on Emergency Flight Support Simulation and Resource Allocation Optimization[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(11): 2610-2613.
- [4] 张洪涛, 崔珊珊, 刘广, 等. 机群保障资源配置建模与优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(4): 1019-1026.
- Zhang Hongtao, Cui Shanshan, Liu Guang, et al. Resource Scheduling for Air Fleet Operations[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2015, 35(4): 1019-1026.
- [5] 徐刚, 张磊, 贲永刚, 等. 多机种大机群再次出动保障资源配置仿真与优化[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 892-899.
- Xu Gang, Zhang Lei, Yun Yonggang, Du Li. Simulation and Optimization of Support Resource Allocation for Large-multi-aerial Fleet Model[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 892-899.
- [6] 吴同晗, 陈春良, 丁苹, 等. 战时维修保障人员数量确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(5): 33-36.
- Wu Tonghan, Chen Chunliang, Ding Ping, et al. Method of Determining Quantity of Wartime Maintenance Support Personnel[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(5): 33-36.
- [7] 王文秀, 祝华远, 孙鲁青, 等. 机务准备中的保障装备配置优化分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 1(9): 6601-6602.
- Wang Wenxiu, Zhu Huayuan, Sun Luqing, et al. Optimum Configuration of Equipment in Maintenance [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 21(9): 6601-6602.
- [8] 张雷, 查晨东, 常天庆, 等. 装甲装备保障测试设备的优化配置模型[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(6): 86-89.
- Zhang Lei, Zha Chendong, Chang Tianqing, et al. Research on Optimization of Allocation Model of Armor Equipment Guarantee Test Equipment[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(6): 86-89.
- [9] 朱亚红, 曹继平, 王正元, 等. 变精度粗糙集的战时装备维修保障资源优化配置[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(6): 40-44.
- Zhu Yahong, Cao Jiping, Wang Zhengyuan, et al. Optimal Deployment of Equipment Maintenance Support Resources Based on Variable Precision Rough Set in Wartime[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(6): 40-44.
- [10] 孙宝琛, 贾希胜, 程中华. 战时装备维修保障资源优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 159-162.
- Sun Baochen, Jia Xisheng, Cheng Zhonghua. Study on Model for Equipment Maintenance Resource Optimization in Wartime[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6): 159-162.
- [11] 吕晓峰, 李保刚, 周玉柱. 基于遗传算法的航空弹药保障人员优化配置[J]. 计算机与现代化, 2011(10): 11-14.
- Lü Xiaofeng, Li Baogang, Zhou Yuzhu. Optimized Collocation of Airborne Ammunition Support Personnel Based on Genetic Algorithm[J]. Computer and Modernization, 2011(10): 11-14.
- [12] 赵芳琴. 基于贝叶斯网络的城市交通规划辅助决策模型[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(3): 32-38, 49.
- Zhao Fangqin. Assistant Decision Model of Urban Traffic Planning Based on Bayesian Network[J]. Journal of Shandong Jiao Tong University, 2021, 29(3): 32-38, 49.
- [13] 党彤. 基于贝叶斯网络的车辆变道行为分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Dang Tong. Analysis of Vehicle Lane Changing Behavior Based on Bayesian network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [14] 赵禄达, 王斌. 基于DBN的电子战指挥辅助决策方法研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(11): 16-20, 100.
- Zhao Luda, Wang Bin. Research on Assistant Decision-Making Method of EW Command Based on DBN[J]. Electro Optic and Control, 2021, 28(11): 16-20, 100.
- [15] 刘卓, 陈艳艳, 路尧, 等. 时空大数据驱动的新型智慧城市交通规划决策支持框架[J]. 地理信息世界, 2020, 27(3): 1-7.
- Liu Zhuo, Chen Yanyan, Lu Yao, et al. A Decision Support Framework for Transportation Planning in the New Smart City Driven by Spatiotemporal Big Data[J]. Geomatics World, 2020, 27(3): 1-7.
- [16] 刘成清, 胡大伟, 黄榕. 基于路径灵活性的两阶段开放式低碳选址-路径问题[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7080-7087.
- Liu Chengqing, Hu Dawei, Huang Rong. Two-echelon Open Low Carbon Location-Routing Problem Based on Path flexibility[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 7080-7087.
- [17] 杨于镭. 拓展的隐马尔可夫模型和贝叶斯网络[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- Yang Yulei. Extended Hidden Markov Model and Bayesian Network[D]. Changsha: University of Defense Science and Technology, 2008.
- [18] 袁朝春, 翁烁丰, 何友国, 等. 基于改进人工势场法的路径规划决策一体化算法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 394-403.
- Yuan Chaochun, Weng Shuofeng, He Youguo, et al. Integration Algorithm of Path Planning and Decision-



- Making Based on Improved Artificial Potential Field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 394-403.
- [19] 李振兴, 王朋飞, 王新, 等. 基于幅值特征和Hausdorff距离的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 169-177.
- Li Zhenxing, Wang Pengfei, Wang Xin, et al. Distribution Network Fault Location Method Based on Amplitude Characteristics and Hausdorff Distance[J]. Power System Automation, 2020, 44(7): 169-177.