

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.014

## 基于可靠度的备件保障中心多目标选址模型

李文<sup>1</sup> 董晓雄<sup>2</sup> 朱强<sup>3</sup> 何桢<sup>4</sup>

(1. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安, 710051; 2. 空军编余飞机储存中心, 平顶山, 467300; 3. 空军指挥学院, 北京, 100089; 4. 空军研究院, 北京, 100085)

**摘要:** 为弥补现有选址模型仅考虑物流成本的不足, 将可靠度的概念引入到备件保障中心选址中, 提出基于可靠度的备件保障中心多目标选址模型。首先, 结合可靠性的定义给出备件保障中心系统可靠度的概念及量化方法; 在此基础上, 构建在满足用户随机需求的前提下, 总运输路径最短、总成本最小、备件保障中心系统可靠度最大的多目标选址模型; 采用可靠度高优先的用户指派原则设计了贪婪启发式求解算法。最后, 结合案例分析验证模型的合理性, 为备件保障中心选址决策提供理论支持。

**关键词:** 备件保障中心; 选址; 多目标; 可靠度; 贪婪启发式算法

**中图分类号:** V215.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0835-06

## Multi-objective Location Model of Spare Parts Support Center Based on Reliability

LI Wen<sup>1</sup>, DONG Xiaoxiong<sup>2</sup>, ZHU Qiang<sup>3</sup>, HE Zhen<sup>4</sup>

(1. Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China; 2. Air Force Surplus Aircraft Storage Center, Pingdingshan, 467300, China; 3. Air Force Command College, Beijing, 100089, China; 4. Air Force Institute, Beijing, 100085, China)

**Abstract:** Aiming at the fact that the existing location model only considers the shortage of logistics cost, the concept of reliability is introduced to the location of the spare parts support center, and a multi-objective location model based on reliability is proposed. Firstly, the concept and quantification method of the reliability of the spare parts support center system is given in combination with the definition of reliability. Secondly, the multi-objective location model with the shortest total transportation path, the lowest total cost and the highest reliability of the spare parts support center system are constructed under the premise of satisfying the random needs of users. Thirdly, a greedy heuristic algorithm is designed based on the principle of high priority of user reliability. Finally, the simulation verifies that the proposed model provides theoretical support for the locations of spare parts support center.

**Key words:** spare parts support center; location; multi-objective; reliability; greedy heuristic algorithm

在国防、计算机、医疗、通信等行业经常面临装(设)备使用过程中的零部件故障问题, 零部件的故障将导致装备作战训练、设备生产经营活动的中断。因此, 在规定的时间内提供可靠的备件是用户关注的焦点。而备件保障中心的选址是制定备件

供应规划的战略问题之一<sup>[1]</sup>。在备件供应网络中, 备件保障中心作为备件周转、分拣、库存管理的据点, 能够克服备件在运动过程中产生的时间和空间障碍, 保证备件满足不同用户的需求, 对备件供应的时效性和经济性都有深远影响。因此, 备件保障

**基金项目:** 国家自然科学基金(71571190, 71601183, L1534031)资助项目; 陕西省自然科学基金(2014JQ2-7045)资助项目。

**收稿日期:** 2018-02-28; **修订日期:** 2018-04-27

**引用格式:** 李文, 董晓雄, 朱强, 等. 基于可靠度的备件保障中心多目标选址模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 835-840. LI Wen, DONG Xiaoxiong, ZHU Qiang, et al. Multi-objective Location Model of Spare Parts Support Center Based on Reliability[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 835-840.

中心的选址问题尤为受人关注。

国内外学者对于设施选址问题进行了深入研究,取得了丰硕的成果,目前设施选址模型主要分为3类:第1类是应用连续型模型选址,代表性方法有重心法<sup>[2]</sup>和交叉中值法<sup>[3]</sup>等。这类方法不受事先指定候选区域的限制,灵活性较大,但由于这个地址可能位于河流或是建筑物等其他无法实现的地点,所以有可能实际上找到的最优地点无法实现;第2类是应用离散型模型选址,选址候选区域为数量有限的指定可行区域,代表性方法有混合整数规划法和启发式规划法。这类方法能够精确描述选址问题的各种约束条件,但现有模型通常以费用最小为目标函数而忽略备件供应的可靠性,并且模型求解过程较为复杂。例如,文献[4]考虑到决策者偏好和热负荷需求,建立了成本最小化和平均综合效率最大化的热电站多目标选址模型;文献[5]建立了紧急备件现场选址的客观模型,采用对象决策方式,提出了紧急物资备件单项目和多项目优化方法;文献[6]建立了顾客需求随机环境下,运作成本最小的中央仓库多期多目标动态选址模型,并设计了基于顾客满意度的贪婪启发式求解算法;第3类是应用各种评价决策方法选址,这类方法的中心思想是用数值的形式将专家凭经验、专业知识做出的判断表示出来,经过分析后对选址进行决策,但该方法以专家的主观判断为主导,所以决策的结果常常受到专家的知识构成、经验及他们所处的地位等因素影响。如文献[7]应用模糊 TOPSIS 决策方法,提出了多标准和多阶段设施选址问题的综合系统方法。文献[8]分析了物流配送中心选址的基本原则和影响因素,通过模糊综合评价方法确定物流配送中心的选址。

针对上述情况,本文构建离散选址模型,为弥补传统选址模型仅考虑物流成本而忽略备件供应的可靠度的不足,引入备件保障中心系统可靠度的概念,并给出了量化方法,在此基础上构建总运输路径最短、总成本最小、备件保障中心系统可靠度最大的多目标选址模型。

## 1 备件保障中心系统可靠度确定

### 1.1 备件保障中心可靠度

首先讨论一个备件保障中心服务于一个用户的可靠度计算方法,如图1所示。

根据国军标 GJB451A—2005,可靠性的定义为:产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠度是可靠性的概率度量。

根据可靠性的定义,结合备件保障的特点,

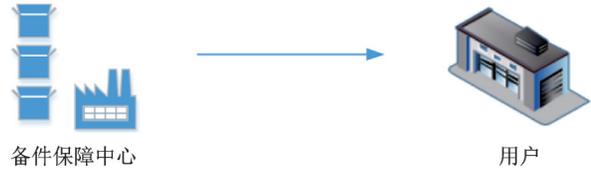


图1 单个备件保障中心服务示意图

Fig.1 A network diagram of spare parts for different stages

备件保障中心的可靠性可理解为在规定的条件下和规定的时间内,为用户提供的备件供应服务保持在一个规定的允许偏差范围内的概率。因此,备件保障中心的可靠度是在一定的条件下在用户要求的时限内将备件送达的概率,可以用下式表示

$$R_{ij} = P(T_{ij} \leq t_j) = P\left(\frac{d_{ij}}{v_{ij}} \leq t_j\right) = P\left(v_{ij} \geq \frac{d_{ij}}{t_j}\right) = 1 - F_{v_{ij}}\left(\frac{d_{ij}}{t_j}\right) \quad (1)$$

式中: $T_{ij}$ 为备件从保障中心*i*运输到用户*j*的时间; $t_j$ 为用户*j*的备件需求时限; $d_{ij}$ 为保障中心*i*到用户*j*的距离; $V_{ij}$ 为备件从保障中心*i*运输到用户*j*的速度; $F_{v_{ij}}$ 为备件从保障中心*i*运输到用户*j*的速度分布函数,交通工具的运输速度具有历史数据,可以用统计的方法确定。

### 1.2 备件保障中心系统可靠度

在现实情况中,通常是一个备件保障中心服务于多个用户或者多个备件保障中心服务于各自服务范围内多个用户所构成的备件保障中心系统,如图1所示。

备件保障中心系统属于并联结构的物流系统<sup>[9]</sup>,是按照某种机制将备件物流任务分配给各个子系统内的物流单元(图2中的1,2,3)。

假设在持续时间为*T*的观测期内,备件保障中

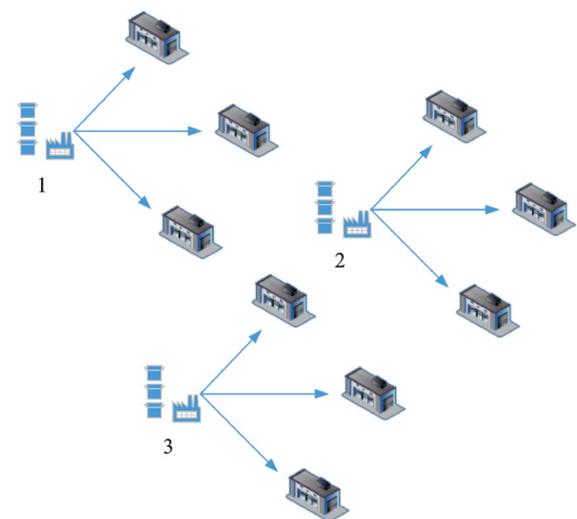


图2 备件保障中心系统服务示意图

Fig.2 A network diagram of spare parts for different stages

心系统实际能够提供的备件物流服务总量累记为  $V_1$ ,对备件保障中心系统而言期望的备件物流服务总量记为  $V_0$ ,则两者之间的比值可以反映备件保障中心系统满足期望备件物流服务水平的程度,也即该备件保障中心系统的可靠度水平

$$V_1 = \sum \sum r_j R_{ij} = \sum r_j \left[ 1 - F_{v_{ij}} \left( \frac{d_{ij}}{t_j} \right) \right]$$

$$V_0 = \sum r_j \tag{2}$$

$$R_s = \frac{V_1}{V_0}$$

式中: $R_s$ 为备件保障中心系统可靠度; $r_j$ 为用户  $j$  的备件需求量; $R_{ij}$ 为备件保障中心  $i$  为用户  $j$  提供备件供应服务的可靠度。

## 2 备件保障中心多目标选址模型

### 2.1 问题描述及假设

备件保障中心多目标选址问题可描述为:在给定的  $p$  个候选位置中选择  $k$  个点,以合理的规模建立备件保障中心,服务  $z$  个用户点的备件需求。如何选择  $k$  个位置,使得在满足用户需求的前提下,总成本(运输成本、备件保障中心建设成本)最小,总路程最短,备件保障中心系统可靠度最大。为方便讨论,作以下几个基本假设:

- (1)每个备件保障中心能够满足其所服务范围内所有用户的备件需求;
- (2)每个用户有且仅有一个备件保障中心为之配送;
- (3)备件供应活动由用户的随机需求驱动,需求量的分布已知。

### 2.2 参数设定

#### (1) 基础参数

$N$ :用户集合,  $N = \{1, \dots, j, \dots, n\}$ ;  
 $M$ :候选位置集合,  $M = \{1, \dots, i, \dots, m\}$ 。

#### (2) 能力需求参数

$C_i$ :备件保障中心  $i$  的供应能力;  
 $r_j$ :用户  $j$  的备件需求量;  
 $d_{ij}$ :候选位置  $i$  到用户  $j$  的距离;  
 $t_j$ :用户  $j$  的备件需求时限。

#### (3) 费用参数

$e_{ij}$ :候选位置  $i$  与用户  $j$  之间的单位运输费用;  
 $f_i$ :候选位置  $i$  建立备件保障中心的固定费用。

#### (4) 0-1 变量

$Z_i$ :候选位置  $i$  是否建设备件保障中心;  
 $Y_{ij}$ :候选位置  $i$  建设的备件保障中心是否服务于用户  $j$ 。

### 2.3 模型构建

#### (1) 目标函数

$$\min \text{obj}_1 = \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} d_{ij} Y_{ij} \tag{3}$$

$$\min \text{obj}_2 = \sum_{i \in M} f_i Z_i + \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} (r_j d_{ij} e_{ij} Y_{ij}) \tag{4}$$

$$\max \text{obj}_3 = \frac{\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} r_j Z_i \left[ 1 - F_{v_{ij}} \left( \frac{d_{ij}}{t_j} \right) \right]}{\sum_{j \in N} r_j} \tag{5}$$

决策者可对上述 3 个目标函数进行综合考虑(总运输路程最短,总成本最小,备件保障中心系统可靠度最大)。

#### (2) 约束条件

①所选备件保障中心总的备件供应能力不小于所有用户总的需求量

$$\sum_{j=1}^n r_j \leq C_i \sum_{i=1}^m Z_i \tag{6}$$

②每个被选备件保障中心的供应能力不小于其服务用户的总需求量

$$\sum_{j=1}^n r_j Y_{ij} \leq C_i \tag{7}$$

③每个用户只由一个备件保障中心提供备件供应服务

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} = 1 \tag{8}$$

④如果候选位置  $i$  没有建设备件保障中心,则不能为用户提供备件供应服务

$$Y_{ij} \leq Z_i \tag{9}$$

### 2.4 模型求解

上述模型为多目标规划模型<sup>[10]</sup>,在一组约束下,有多个不同的目标函数进行优化设计,多目标优化一般不存在各目标均最优的理想解,通常运用线性加权法<sup>[11]</sup>、主要目标法<sup>[12]</sup>等方法将其转化为单目标优化问题。由于线性加权法权重值不易取得共识,本文采用主要目标法求解,即确定一个目标作为主要目标,把其余的目标作为次要目标,并根据决策者的经验,为次要目标选取一个适宜的界限值,把次要目标转化为约束条件,将原多目标问题转化为一个在新的约束下,求解主要目标最优解的单目标优化问题。

(1)以总路径最短化为主要目标,即  $\text{obj}_1$ 。

(2)将总成本目标函数式  $\text{obj}_2$  和可靠度目标函数式  $\text{obj}_3$  转化为约束条件

$$\sum_{i \in M} f_i Z_i + \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} (r_j d_{ij} e_{ij} Y_{ij}) < C_0 \tag{10}$$

$$\frac{\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} r_j Z_i \left[ 1 - F_{v_{ij}} \left( \frac{d_{ij}}{t_j} \right) \right]}{\sum_{j \in N} r_j} \geq R_0 \tag{11}$$

式中： $C_0$ 为决策的成本上限， $R_0$ 为决策的可靠度下限，其他约束不变。

(3)转化后的单目标规划属 NP-Hard，可用分支定界法<sup>[13]</sup>、拉格朗日乘子法<sup>[14]</sup>进行求解，但由于：  
①随着问题规模的增大会导致计算量呈指数级增长；  
②目标函数多峰，求解过程往往收敛于局部最优等原因，使得该方法的运用较为困难。

针对上述情况，本文设计了贪婪启发式算法<sup>[6,15]</sup>，该算法可以求得较高精度的近似解。其主要步骤如下：

**步骤1** 令所有的候选地址都建设备件保障中心。

**步骤2** 令每个用户由距离其最近的备件保障中心提供服务，并计算出此方案的可靠度、总成本和总路程。

**步骤3** 设定可靠度阈值为  $R_0$ ，成本阈值为  $C_0$  ( $R_0$ 、 $C_0$ 的取值可由决策者给定)，如果可靠度大于  $R_0$ 且总成本小于  $C_0$ ，则输出选址方案及相应用户指派方案，并记录此时的可靠度、总成本和总路程；否则继续下一步。

**步骤4** 移除一个备件保障中心建设地址，将其所服务的用户指派给其余距离其最近的备件保障中心，满足移除该地址的情况下，可靠度提升最大，转入步骤2。

**步骤5** 对于方案  $P_X$  和  $P_Y$ ，如果  $obj_1(P_X) = obj_1(P_Y)$ ，则取  $\max\{obj_2(P_X), obj_2(P_Y)\}$ ；如果  $obj_1(P_X) > obj_1(P_Y)$ 且  $obj_2(P_X) < obj_2(P_Y)$ ，则舍弃，否则保留；将结果以总成本递减方式排序后输出。

**步骤6** 决策者根据  $R_0$ 、 $C_0$  权衡最后方案，算法结束。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例背景

某备件保障区域内有4个候选备件保障中心地址 ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 和10个用户 ( $j=1, 2, \dots, 10$ )，每个用户和候选备件保障中心地址之间的距离及其备件需求量如表1所示，候选位置  $i$  与用户  $j$  之间的单位运输成本  $e_{ij}$  如表2所示，候选位置  $i$  建设备件

保障中心的费用如表3所示，用户  $j$  的备件需求时限  $t_j$  为10，备件从保障中心  $i$  运输到用户  $j$  的速度  $V_{ij} = N(55, 10^2)$ ，试确定备件保障中心选址方案。

表1 用户基本数据

Tab.1 User base data

User	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$r_j$
$A_1$	610	500	450	510	1 200
$A_2$	430	610	560	710	1 500
$A_3$	341	350	356	230	900
$A_4$	156	198	235	208	860
$A_5$	280	350	342	310	2 000
$A_6$	305	320	310	250	1 800
$A_7$	450	385	419	420	2 600
$A_8$	150	180	120	166	800
$A_9$	550	520	589	501	1 300
$A_{10}$	260	289	247	302	600

表2 单位运输成本  $e_{ij}$

Tab.2 Unit transportation cost

元/km

User	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
$A_1$	0.5	0.8	0.6	0.9
$A_2$	0.3	0.6	0.4	0.9
$A_3$	0.6	0.5	1.1	0.8
$A_4$	1.1	1.5	0.5	0.4
$A_5$	0.7	0.6	0.5	1.5
$A_6$	1.3	0.8	1.5	0.6
$A_7$	1.1	0.2	0.6	1.4
$A_8$	0.5	0.4	0.2	0.3
$A_9$	0.5	0.9	0.8	1.3
$A_{10}$	0.2	0.6	0.8	1.6

表3 候选地址建设备件保障中心费用

Tab.3 Address of candidate base data

元

$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
850 000	880 000	840 000	860 000

#### 3.2 算例求解

在 Matlab2011 环境下编写求解程序。在 CPU 4 GHz、内存 4 GB 和 Windows7 操作系统的计算机上运行算法，得到计算结果如表4所示。

表4 模型求解结果

Tab.4 Model solution

$R_0$	$C_0$	选址方案	备件保障中心服务用户方案	总成本/元	总运输路程/km	可靠度
0.932 8	$\infty$	$M(1, 2, 3, 4)$	$M_1 \rightarrow (A_2 A_4 A_5); M_2 \rightarrow (A_7);$ $M_3 \rightarrow (A_1 A_8 A_{10}); M_4 \rightarrow (A_3 A_6 A_9)$	6 107 326	3 049	0.932 8
0.924 2	6 107 326	$M(1, 3, 4)$	$M_1 \rightarrow (A_2 A_4 A_5); M_3 \rightarrow (A_1 A_7 A_8 A_{10});$ $M_4 \rightarrow (A_3 A_6 A_9)$	5 680 766	3 083	0.924 2
0.904 3	5 680 766	$M(1, 3)$	$M_1 \rightarrow (A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_9);$ $M_3 \rightarrow (A_1 A_7 A_8 A_{10})$	4 793 816	3 298	0.904 3
0.881 9	4 793 816	$M(1)$	$M_1 \rightarrow (A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 A_9 A_{10})$	4 582 616	3 532	0.881 9

以表4第1行为例, $M(1,2,3,4)$ 表示选择候选地址1,2,3,4全都建设备件保障中心的决策方案; $M_1 \rightarrow (A_2 A_4 A_5)$ 表示用户 $A_2, A_4, A_5$ 由备件保障中心 $M_1$ 提供备件供应服务, $M_2 \rightarrow (A_7)$ 表示用户 $A_7$ 由备件保障中心 $M_2$ 提供备件供应服务; $M_3 \rightarrow (A_1 A_8 A_{10})$ 表示用户 $A_1, A_8, A_{10}$ 由备件保障中心 $M_3$ 提供备件供应服务; $M_4 \rightarrow (A_3 A_6 A_9)$ 表示用户 $A_3, A_6, A_9$ 由备件保障中心 $M_4$ 提供备件供应服务,其他行作相同理解。

将各个选址方案分别以总成本维、总运输路程维和可靠度维绘制3维曲线,如图3所示。

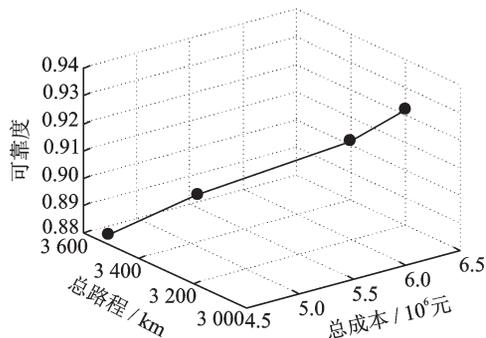


图3 选址方案总成本、总运输路程、可靠度三维曲线  
Fig.3 The three contour curve for the total cost, total transportation distance and reliability of site selection

### 3.3 结果分析

由图3和表4可以得出如下结论,可为实际应用提供借鉴与指导。

(1)在一定的范围内,总成本与可靠度正相关,而总成本和可靠度均与总运输路程负相关。总成本越大,总运输路程越小,可靠度越高,反之亦然;

(2)备件保障中心多目标选址模型综合考虑了总成本、总运输路程与可靠度3个因素,是对传统物流成本最小选址模型的扩展,它可以为决策者提供更全面、更科学的选择建议,让决策者根据自身发展战略(如成本优先、总运输路程优先还是可靠度优先)自主选择,因此更具优越性。

## 4 结 论

(1)备件保障中心多目标选址决策模型同时考虑了用户随机需求、备件保障中心系统可靠度、运输成本、备件保障中心建设成本和总运输路程等因素,是对传统选址模型的拓展和延伸,并且可以和传统选址模型结合,能够为备件保障中心选址问题提供更加灵活全面的决策依据。

(2)本文建立了最小化运输路径为主要目标的选址模型,并设计了贪婪启发式算法得到模型的一组非劣解,贪婪启发式求解算法适用于备件需求

分布为任意类别的情况;在某种环境下,如果战略转向成本优先或者可靠度优先,那么选址的主要目标和选址结果会发生变化。问题的解会随着问题的主要目标发生相应变化。

(3)本文从时间角度研究备件保障中心可靠度。其实,可靠度还可以采取其他的构造方式,如定义可靠度为用户需求被满足的比例。可靠度构造方式不同会影响目标函数,从而产生不同的求解结果。

### 参考文献:

- [1] MUCKSTADT J A. Analysis and algorithms for service parts supply chains[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 31-42.
- [2] DOOLUN I S, PONNAMBALAM S G, SUBRAMANIAN N, et al. Data driven hybrid evolutionary analytical approach for multi objective location allocation decisions: Automotive green supply chain empirical evidence[J]. Computers & Operations Research, 2018, 1(8): 18-32.
- [3] 王雅梦, 张臣. 物流中心选址的决策分析研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(7): 125-127.  
WANG Yameng, ZHANG Chen. Logistics center location decision analysis research[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(7): 125-127.
- [4] FENG Ren. Site selection optimization for thermal power plant based on rough set and multi-objective programming[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3247(960): 1501-1507.
- [5] MU Xiangjing, GUO Jikun, YANG Zhendong, et al. Study on the site selection of emergency material reserve point based on multi-objective decision method [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2016, 16(3): 481-492.
- [6] 周健, 牛林宁, 钱建飞. 双渠道供应链多期多目标动态选址模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(12): 1081-1085.  
ZHOU Jian, NIU Linning, QIAN Jianfei. Multistage and multi-objective dynamic location model under the dual-channel supply chain[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(12): 1081-1085.
- [7] ÇEBİ F, OTAY İ. Multi-criteria and multi-stage facility location selection under interval type-2 fuzzy environment: A case study for a cement factory [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2015, 8(2): 330-344.
- [8] WANG Qingjun, WANG Xiaobin, WANG Qianqian. Study on site selection method of third-

- party logistics distribution center[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2341(310): 614-618.
- [9] 余小川, 季建华. 物流系统的可靠度及其优化研究[J]. 管理工程学报, 2007, 21(1): 67-69.  
YU Xiaochuan, JI Jianhua. The researches on the optimization reliability of logistics system[J]. Journal of Industrial Engineering Engineering Management, 2007, 21(1): 67-69.
- [10] 孙贇, 王瑛, 李超. 基于P-(EV)准则的不确定随机多目标规划问题求解[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(5): 645-652.  
SUN Yun, WANG Ying, LI Chao. Solution of uncertain stochastic multi-objective programming problem based on P-(EV) criterion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(5): 645-652.
- [11] 徐思敏, 姜雨, 王欢, 等. 基于NSGA-II的停机位多目标指派建模与仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(6): 823-828.  
XU Simin, JIANG Yu, WANG Huan, et al. Modeling and simulation of multi-objective assignment of stops based on NSGA-II [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(6): 823-828.
- [12] 刘洋, 任凤玉, 丁航行, 等. 基于主要目标法的堑沟底部结构位置优化[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 314-318.  
LIU Yang, REN Fengyu, DING Hangxing, et al. Position optimization of trench bottom structure based on the main object method[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(3): 314-318.
- [13] WANG Meng, LIU Kai. Location of electric vehicle charging station based on spatial clustering and multi-hierarchical fuzzy evaluation[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(1): 89-96.
- [14] 张惠珍, 魏欣, 马良. 求解无容量设施选址问题的半拉格朗日松弛新方法[J]. 运筹学学报, 2015, 19(4): 37-47.  
ZHANG Huizhen, WEI Xin, MA Liang. A new semi-Lagrangian relaxation method to solve the un-capacitated facility location problem[J]. Operations Research Transactions, 2015, 19(4): 37-47.
- [15] 朱伟, 徐克林, 周炳海, 等. 基于贪婪启发式的多期多目标动态网络选址[J]. 上海交通大学学报, 2012, (02): 269-275.  
ZHU Wei, XU Kelin, ZHOU Binghai, et al. Study on multi-stage multi-objective network location problem based on greedy heuristic algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, (2): 269-275.

(编辑:张蓓)