

大数据驱动下自动化码头资源冲突辨识

左世萍, 初良勇, 胡美丽

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为辨识自动化码头资源冲突, 从而更好地管理自动化码头资源, 以厦门远海自动化码头为研究对象, 应用模糊聚类算法, 对码头大数据进行聚类分析, 得出影响码头效能因素的分类结果。利用分类结果构建熵权物元模型, 对码头资源冲突进行辨识, 得出自动化码头资源冲突仿真图。通过实例分析可知: 自动化码头资源冲突曲线呈现“V”型特征, 各类冲突因素相互交叉, 末端作业的资源冲突相对显著。

[关键词] 大数据; 自动化; 集装箱码头; FCM 算法; 物元模型

[中图分类号] U 691

Research on Resource Conflict Identification of Automated Container Terminal Driven by Big Data

ZUO Shiping, CHU Liangyong, HU Meili

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to identify conflicts in sources of automated terminals, so as to better manage the distribution of such sources, Xiamen Ocean Gate Automated Terminal is taken as the research subject. The FCM algorithm is applied to cluster analyze the big data of the terminal, and the classification results affecting the terminal efficiency factors are obtained. The classification results are used to construct an entropy weight matter element model to identify terminal resource conflicts. A simulation diagram of the automated terminal resource conflicts is carried out. The analysis of examples reveals that the automated terminal resource conflict curve presents a “V” type feature, with various conflict factors intersecting with each other, and the resource conflict at the end of the terminal operation is relatively significant.

Keywords: big data; automated; container terminal; FCM model; matter element model

0 引言

随着我国港口航运业高速发展, 追求绿色化和智能化的自动化集装箱码头将成为未来集装箱码头的发展趋势。港口资源整合和码头升级需要大数据技术的支持^[1], 如何从自动化集装箱码头大数据中获取有价值的、联动的信息, 找到码头资源要素间存在的冲突, 进而优化自动化码头系统, 是亟待解决的问题。国内外专家学者对自动化集装箱码头做了较为深入地研究。Wei Qi^[2]为提高集装箱码头的生产率和运营安全性, 通过分析专家调查问卷, 完成集装箱码头进出服务的整合。Lu Zhen 等^[3]提出了分析模型和性能测量的方法, 比较了一种新型的自动化集装箱码头系统, 和广泛使用的基于 AGV (automated

[收稿日期] 2019-06-24

[基金项目] 福建省自然科学基金(2017J01796; 2017J01797); 集美大学研究生教育教学改革项目(2016)

[作者简介] 左世萍(1994—), 女, 硕士生, 从事交通运输系统规划研究。通信作者: 初良勇(1973—), 男, 副教授, 硕士, 博士, 研究方向为交通运输系统规划、国际航运与物流管理。

guided vehicle) 系统之间的传输效率和堆叠容量。Binghuang Cai 等^[4]考虑跨越运载工具 (straddle carries, SC) 行进时间, SC 等待时间和高优先级容器转移工作的结束时间, 研究了自动化集装箱码头的自主跨运营调度 (autonomous straddle carries scheduling, ASCS) 问题。黄成等^[5]为提高船舶夜航光环境评价精度, 提出一种基于云模型改进物元结构的船舶夜航光环境评价模型。韩笑乐等^[6]考虑船舶到港时间及市场需求的不确定性, 运用动态干扰管理方法, 协同调度集装箱进出口码头各项资源。王磊等^[7]结合聚类算法的迭代计算特点, 提出并实现了一种基于 Spark 平台的聚类系统。蒋菱等^[8]借助大数据技术, 对用电行为分析在处理海量数据时效率低下的问题, 提出了基于 MapReduce 技术的模糊 C 均值聚类 (FCM) 并行算法。关忠河等^[9]以某大型船舶进港靠外高桥泊位为研究对象, 应用熵权物元模型, 对不同时刻船舶进出港的风险动态进行评价。黄良丰等^[10]结合大数据背景, 分析港口大数据的特点, 介绍国内外港口大数据应用现状, 探讨大数据在集装箱码头智能化管理中的应用。

上述文献主要集中对码头资源协调、资源因素、系统流程的改善进行研究, 而对自动化码头资源冲突辨识, 特别是在大数据环境下识别自动化集装箱码头资源冲突问题的研究较少。本文通过模糊聚类方法, 分析自动化码头大数据, 用大数据解析影响码头资源冲突的主要因素, 并对自动化码头资源冲突进行分类, 在此基础上构建物元模型, 辨识自动化码头资源冲突情况, 模拟仿真自动化码头动态资源冲突, 提高自动化集装箱码头的作业效率, 为码头运营优化提供策略依据。

1 问题分析

为了分析影响自动化码头效能的资源冲突情况, 需要准确、客观地辨识自动化码头存在的资源冲突。由于码头各作业环节间存在大量的资源冲突, 在获取自动化码头大数据的情况下, 科学的对影响自动化码头资源冲突因素进行归类分析是辨识资源冲突的关键。图 1 为自动化码头资源冲突辨识研究基本框架。本文要解决的问题难点: 1) 对自动化码头大数据进行归类分析; 2) 根据码头大数据的分类情况, 辨识自动化码头资源冲突因素及其内部联系。

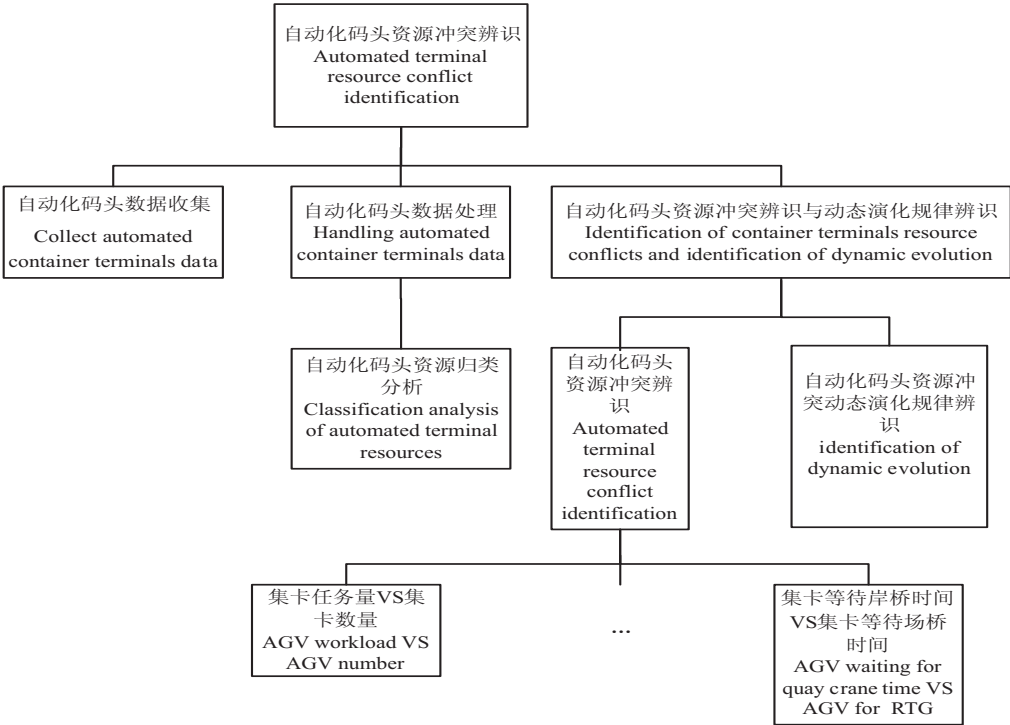


图 1 自动化码头资源冲突辨识研究框架

Fig. 1 Automated terminal resource conflict identification research framework

2 模型和算法设计

2.1 FCM 算法

由于自动化码头的海量数据交叉多、差异化较大，为了提高自动化码头资源冲突辨识的效率，需要对数据进行处理，统计自动化码头资源类别，以便实现快速、准确地分析自动化码头资源冲突。由于模糊聚类（Fuzzy Clustering）算法允许一个数据对象属于多个不同的聚类，且计算过程简单，易于在计算机上实现，适用于对自动化码头的复杂数据进行划分，因此本文选择模糊聚类算法进行数据处理。

通过迭代计算目标函数，求得目标函数的最小值，从而确定最终的聚类中心，再根据隶属度矩阵来度量每个数据点相对每个类的隶属度，依次确定各个数据的聚类类别。

目标函数：

$$\min J_m(U, \nu) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

其中： c 为 n 个样本数据 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的类族； ν 是每组的聚类中心； $u_{ij} = u_{X_i}(x_j)$ 表示样本 x_j 与待分类对象子集 $X_i (1 \leq i \leq c)$ 之间的隶属关系， u_{ij} 的取值范围为 $[0, 1]$ ，即每个样本与子集间的隶属关系可由 $0 \sim 1$ 间的实数模糊表示； $m \in [1, \infty)$ 是模糊聚类指数， m 越大，聚类结果越模糊； d_{ij} 表示样本 j 到第 i 个聚类中心 ν_i 之间的距离。

约束条件：

$$u_{ij} = 1 / \left(\sum_{k=1}^c (d_{ij} / d_{kj})^{2/(m-1)} \right); \quad (2)$$

$$d_{ij} = \|x_j - \nu_i\|; \quad (3)$$

$$\nu = \left(\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j \right) / \left(\sum_{j=1}^n u_{ij}^m \right). \quad (4)$$

式（2）定义了隶属度矩阵 u_{ij} 是样本 x_i 属于 j 类的可能性；式（3）表示样本 x_j 到聚类中心的欧式距离；式（4）是聚类中心的计算公式。

2.2 物元模型

1) 物元模型的构建

在自动化码头资源数据归类的基础上，建立物元模型来描述自动化码头资源冲突的特征。物元分析理论是为了解决“事物、特征、量值”三者之间的关系^[11]。事物在某一时间的状态 T 有 n 个指标 s_1, s_2, \dots, s_n ，则多维物元模型为

$$R = \begin{bmatrix} T & s_1 & o_1 \\ & s_2 & o_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & s_n & o_n \end{bmatrix} = [T \quad S \quad O]; S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix}, O = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_n \end{bmatrix}.$$

其中： T 为所要描述的自动化码头资源冲突对象； S 为冲突因素的特征； O 为资源冲突因素 T 的特征 S 的量值； O 的取值范围是 S 的量域。

T, S, O 为物元 R 的三要素， $[S \quad O]$ 为对象 T 的特征元。

若事物有 l 个状态 T_1, T_2, \dots, T_l ，事物 T_j 的指标 s_i 对应的量值为 o_{ij} ，则复合物元模型为

$$R_{n,l} = \begin{bmatrix} & T_i & \cdots & T_l \\ s_1 & o_{11} & \cdots & o_{1l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_n & o_{n1} & \cdots & o_{nl} \end{bmatrix}$$

2) 确定关联函数

物元模型的关联度的实质是某个事物与标准事物关联性大小的量度。自动化码头资源冲突存在于

各资源作业时间的衔接上, 因此采用加权平均集中处理, 表示为

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_w \circ \mathbf{R}_\xi = \begin{bmatrix} & T_1 & \cdots & T_l \\ K_j & K_1 = \sum_{i=1}^n w_i \xi_{i1} & \cdots & K_l = \sum_{i=1}^n w_i \xi_{il} \end{bmatrix} \circ$$

式中: K_j 为第 j 个状态的关联度; \mathbf{R}_k 为由 l 个关联度所组成的关联度复合物元; T_l 为事物有 l 个状态; w_i 为状态 T_i 下指标的权重; ξ_{il} 为隶属度系数。

3) 熵权法确定权重

自动化码头资源冲突中, 可能存在人为因素的影响, 故使用评估指标值构成的判断矩阵来确定指标权重, 尽可能消除各指标权重计算的主观因素影响, 使结果与实际情况贴近。采用熵权法确定评估指标权重的步骤如下:

以 $w_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 表示某一时刻 T 的状态, 第 i 项指标的权重, 则 R_w 为事物 T_j 的各项指标 s_i 的权重复合物元, 即 $\mathbf{R}_w = \begin{bmatrix} & s_1 & \cdots & s_n \\ w_i & w_1 & \cdots & w_n \end{bmatrix} \circ$

4) 隶属度矩阵

隶属度系数即 $\xi_{ij} = (o_{ij} - \min o_{ij}) / (\max o_{ij} - \min o_{ij}) \circ o_{ij}$ 为事物 T_j 的指标 s_i 对应的量值, $(i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, l)$ 。

ξ_{ij} 为第 j 个状态与标准状态间第 i 项指标的关联系数, 由此可得关联系数矩阵为

$$\mathbf{R}_\xi = \begin{bmatrix} & T_1 & \cdots & T_l \\ s_1 & \xi_{11} & \cdots & \xi_{1l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_n & \xi_{n1} & \cdots & \xi_{nl} \end{bmatrix} \circ$$

求出关联度后, 按照最大关联度原则, 对关联度进行比较, 从而获得最符合要求的解。关联度大者为强, 关联度小者为弱。用 $K^* = \max(K_1, K_2, \cdots, K_l)$ 表示最大关联度, 它所对应的事物就是最符合要求的事物。

3 实证分析

3.1 基于 FCM 的自动化码头资源分类

本文收集了厦门远海自动化码头 20160101—20161231 的作业数据, 以此为基础对自动化码头资源冲突分类展开研究。每日码头作业数据主要包括 15 个资源特征, 分别是作业类型、岸桥数量、装卸任务的起始位置、目标位置、作业开始时间、集卡数量、场桥数量、船舶停靠时间、船舶停靠位置、装卸任务量、作业时间、场桥等待时间、集卡等待场桥时间、集卡等待岸桥时间、集卡任务量。

根据同一时间段的作业量将远海自动化码头的作业数据分为以下几类: $(0, 10], (10, 20], (20, 30], (30, 40], (40, 50], (50, 60], (60, 70], (70, 80], (80, 90], (90, \infty)$, 单位为万 TEU。

在 Matlab 中进行仿真试验, 模糊指数 $m = 1.5$, 阈值 $\varepsilon = 0.005$, 最大迭代次数为 $b_{\max} = 80$, 最大分类次数 $c_{\max} = \sqrt{365} \approx 19$ 次。重复进行 50 次实验, 统计正确的分类次数。实验结果如表 1 所示。

在实验中, 聚类数目的取值范围 $c \in [2, 19)$, 在 c 取不同得值时, 有效性函数对应的值也不同。从表 2 可知, 当 $c = 4$ 时, 有效性函数值最小。根据聚类结果有效性函数的性质, 有效性函数值越小, 表示分类结果越好, 所以当类别数为 4 时, 聚类效果最好。

表 1 实验结果
Tab.1 Experimental result

算法	50 次正确分类统计次数	正确率	运行时间
Algorithm	50 times correct classification statistics/次	Correct rate/%	Operation hours/s
FCM	42	84	364

表 2 不同聚类数 c 对应的有效函数值
Tab.2 Effective function value corresponding to different cluster numbers c

聚类类别数 c Number of cluster categories c	有效性函数值 Validity function value	聚类类别数 c Number of cluster categories c	有效性函数值 Validity function value	聚类类别数 c Number of cluster categories c	有效性函数值 Validity function value
2	0.763 9	8	0.537 6	14	0.678 6
3	0.682 4	9	0.558 7	15	0.697 3
4	0.320 8	10	0.575 7	16	0.706 0
5	0.425 8	11	0.620 8	17	0.720 8
6	0.461 9	12	0.630 6	18	0.742 2
7	0.485 2	13	0.674 1		

在自动化码头资源冲突的关系中，作业类型、装卸任务的起始位置、目标位置、船舶停靠位置这些因素不能直接用数字表示，而是由一些等级划分或者文字描述。本文选用闭区间 $[0, 1]$ 上的模糊子集族来刻画。0 代表这个属性不存在，1 代表这个属性在实例中的状况是最好的，将以上的数据进行聚类分析，剔除因所包含样本量过小而明显不合理的坏数据，获得了 4 类典型影响因素，如图 2 所示。

由聚类分析的结果可知，样本一共分成了 4 类，即泊位（船舶停靠位置、泊位偏移量、船舶停靠时间）、岸桥（实际岸桥配置数量、计划岸桥数量）、场桥（装卸任务位置、装卸任务直线距离、装卸任务作业开始时间、装卸任务量、装卸任务等待时间）、集卡（集卡任务量、作业时间、集卡到达时间、集卡等待场桥时间、集卡等待岸桥时间）。通过每一类所包含的样本可以发现其数据属性的关联性很高，在同一类中，样本之间相同属性差别不是很大。

3.2 物元模型冲突辨识

为了分析资源间的关系，在自动化码头资源冲突影响因素分类的基础上，建立自动化码头关键资源冲突影响因素集，使用物元模型描述物元的特征及量值，如表 3 所示。

其中： T_b, T_p, T_f, T_a 分别表示泊位、岸桥、场桥与集卡的因素； S_b, S_p, S_f, S_a 分别表示影响泊位、岸桥、场桥与集卡的特征集 $\{s_{b1}, s_{b2}, s_{b3}\}, \{s_{p1}, s_{p2}\}, \{s_{f1}, \cdots, s_{f5}\}, \{s_{a1}, \cdots, s_{a5}\}$ ； O_b, O_p, O_f, O_a 分别表示 T_b, T_p, T_f, T_a 关于 S_b, S_p, S_f, S_a 的量值集 $\{o_{b1}, o_{b2}, o_{b3}\}, \{o_{p1}, o_{p2}\}, \{o_{f1}, \cdots, o_{f5}\}, \{o_{a1}, \cdots, o_{a5}\}$ 。

任意选取厦门远海码头船舶从靠泊起连续 15 h 的作业数据，应用熵权物元分析方法进行计算，确定不同时间自动化码头资源冲突因素间的关联度大小。由于本文涉及的因子各量纲不尽相同，因此根据熵权法确定资源冲突因素所占权重，如式（5）所示。

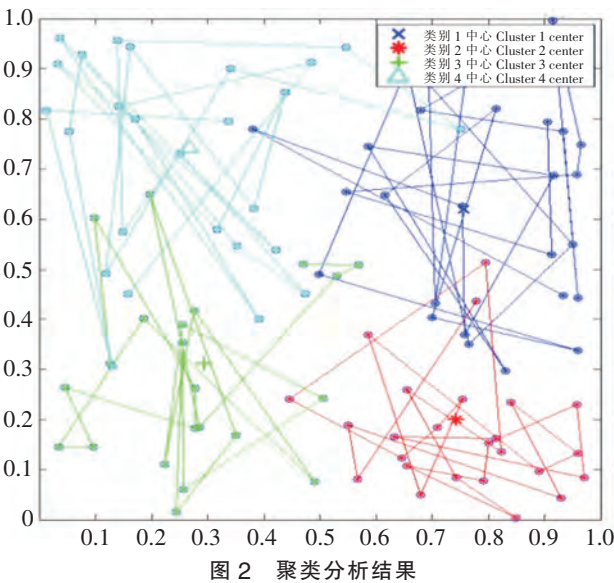


Fig.2 Cluster analysis results

表 3 自动化码头资源冲突物元模型

Tab.3 Automated terminal resource conflict matter

自动化码头资源冲突因素 Automated terminal resource conflict factors	物元模型 Matter element model	
T_b	$R_b = \begin{bmatrix} \text{泊位 Berth} & \text{船舶停泊位置 Ship mooring position} & o_{b1} \\ \text{泊位偏移量 Berth offser} & & o_{b2} \\ \text{船舶停靠时间 Ship mooring time} & & o_{b3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_b & s_{b1} & o_{b1} \\ & s_{b2} & o_{b2} \\ & s_{b3} & o_{b3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_b & S_b & O_b \end{bmatrix}$	
T_p	$R_p = \begin{bmatrix} \text{岸桥 Quay crane} & \text{实际岸桥配置数量 Actual quay crane configuration auqntity} & o_{p1} \\ & \text{计划岸桥数量 Number of planned quay crane} & o_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p & s_{p1} & o_{p1} \\ & s_{p2} & o_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p & S_p & O_p \end{bmatrix}$	
T_f	$R_f = \begin{bmatrix} \text{场桥 RTG} & \text{装卸任务位置 Loading and unloading task position} & o_{f1} \\ & \text{装卸任务数量 Number of loading and unloading tasks} & o_{f2} \\ & \text{装卸任务直线距离 Loading and unloading task straight line distance} & o_{f3} \\ & \text{装卸任务开始作业时间 Loading and unloading task start working time} & o_{f4} \\ & \text{装卸任务等待时间 Loading and unloading task waiting time} & o_{f5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_f & s_{f1} & o_{f1} \\ & s_{f2} & o_{f2} \\ & s_{f3} & o_{f3} \\ & s_{f4} & o_{f4} \\ & s_{f5} & o_{f5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_f & S_f & O_f \end{bmatrix}$	
T_a	$R_a = \begin{bmatrix} \text{集卡 AGV} & \text{集卡到达时间 Arrival time of AGV} & o_{a1} \\ & \text{集卡任务量 Task volume of AGV} & o_{a2} \\ & \text{集卡作业时间 Working time of AGV} & o_{a3} \\ & \text{集卡等待岸桥时间 Times to AGV waiting for the quay crane} & o_{a4} \\ & \text{集卡等待场桥时间 Times to AGV waiting for the RTG} & o_{a5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_a & s_{a1} & o_{a1} \\ & s_{a2} & o_{a2} \\ & s_{a3} & o_{a3} \\ & s_{a4} & o_{a4} \\ & s_{a5} & o_{a5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_a & S_a & O_a \end{bmatrix}$	

$$R_w = \begin{bmatrix} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ w_i & 0.215 & 0.201 & 0.272 & 0.308 \end{bmatrix}。$$

(5)

根据复合物元矩阵变换为隶属度矩阵的公式，计算出各资源冲突因素的隶属度 R_{ξ} 。

$$R_{\xi} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} \\ s_1 & 0.366 & 0.145 & 0.209 & 0.366 & 0.308 & 0.012 & 0.110 & 0.000 & 0.069 & 0.808 & 0.756 & 0.634 & 0.616 & 1.000 & 0.948 \\ s_2 & 0.227 & 0.121 & 0.277 & 0.404 & 0.284 & 0.000 & 0.312 & 0.674 & 0.518 & 0.241 & 0.901 & 1.000 & 0.829 & 0.226 & 0.511 \\ s_3 & 0.353 & 0.294 & 0.931 & 1.000 & 0.824 & 0.000 & 0.509 & 0.941 & 0.657 & 0.451 & 0.716 & 0.775 & 0.902 & 0.980 & 0.784 \\ s_4 & 0.006 & 0.514 & 0.000 & 0.827 & 0.809 & 0.861 & 0.971 & 1.000 & 0.931 & 0.867 & 0.549 & 0.012 & 0.636 & 0.739 & 0.867 \end{bmatrix}$$

厦门远海自动化码头的资源冲突关联度 R_k 。

$$R_k = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 & K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \\ F & 0.222 & 0.294 & 0.354 & 0.687 & 0.597 & 0.268 & 0.524 & 0.699 & 0.584 & 0.612 & 0.707 & 0.552 & 0.740 & 0.755 & 0.787 \end{bmatrix}$$

将远海码头船舶从靠泊起连续 15 h 的资源冲突因子，在 Matlab 中进行多次随机量化，可以得到多次随机仿真下的风险关联度结果，远海自动化码头不同时间动态资源冲突仿真见图 3。

对泊位、岸桥、场桥、集卡 4 个资源冲突因素进行多次随机仿真，可以得知不同时间段，自动化码头资源冲突波动性较大，需要码头管理人员合理安排资源。高资源冲突主要分布在 21 时和 9 时左右，此时船舶因将离港或靠泊而装卸频繁，特别是在 14 时之后，码头资源冲突急剧上升，码头应在保持岸桥连续无延迟作业的基础上，提高设备的装卸效率。

4 结论与展望

针对自动化集装箱码头的资源冲突因素,提出并实现了 FCM 聚类分析,对自动化码头资源冲突因素进行分类,进一步细化了自动化码头效能的影响因素。在此基础上,在 Matlab 中采用物元模型,研究聚类结果间的关系,规避人为因素的影响,使结果更为客观可靠。

影响自动化码头资源冲突因素是动态变化的,不同时间段的影响因素作用不同。自动化码头资源冲突仿真具有较强的随机性和时间性。基于熵权的物元模型,能够从数据本身的无序性反映出自动化码头资源整体冲突的动态特性。通过对厦门远海自动化码头大数据的分析结果表明:在自动化码头潜在的资源冲突中,集卡到达时间是首要影响因素,次要为场桥(装卸等待时间、装卸任务的数量)、泊位(船舶靠泊时间),岸桥(岸桥的配置数量)和泊位(泊位靠泊位置),影响相对较小。本文研究结果可为提升码头效能和制定码头运转策略提供参考。

物元模型不仅可以对因素进行分析,还可以对码头效能进行评估,对影响码头效能的各个因素进行评价分析。本文仅使用熵权物元模型对自动化码头资源冲突因素作出分析,在接下来的研究中,还可继续进行相关效能评估方面的探索。

[参考文献]

- [1] MAYER-SCHÖNBERGER V, CUKIER K. Big data: a revolution that will transform how we live, work and think [M]. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013: 26.
- [2] QI W. Conceptual design and importance analysis of industry 4.0 based products and services applied in container terminals [J]. Korean Journal of Logistics, 2018, 26(3): 91-110.
- [3] ZHEN L, LOO HAY LEE, EK PENG CHEW, et al. A comparative study on two types of automated container terminal systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(1): 56-69.
- [4] BINGHUANG C, SHOUDONG H, DIKAI L, et al. Multiobjective optimization for autonomous straddle carrier scheduling at automated container terminals [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3): 711-725.
- [5] 黄成, 朱金善, 张锋, 等. 基于云模型改进物元结构的船舶夜航光环境评价模型 [J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(4): 43-48.
- [6] 韩笑乐, 钱丽娜, 陆志强, 等. 周期环境下集装箱码头资源分配的动态干扰管理 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2018, 46(2): 264-272.
- [7] 王磊, 邹恩岑, 曾诚, 等. 基于 Spark 的大数据聚类研究及系统实现 [J]. 数据采集与处理, 2018, 33(6): 1077-1085.
- [8] 蒋菱, 王旭东, 于建成, 等. 基于分布式计算的海量用电数据分析技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(12): 176-181.
- [9] 关忠河, 胡甚平. 大型船舶进出上海港航行风险分析 [J]. 中国航海, 2018, 41(4): 90-93, 111.
- [10] 黄良丰, 王男男, 严翀宇, 等. 大数据背景下的集装箱码头智能化管理 [J]. 集装箱化, 2018, 29(6): 8-10.
- [11] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)

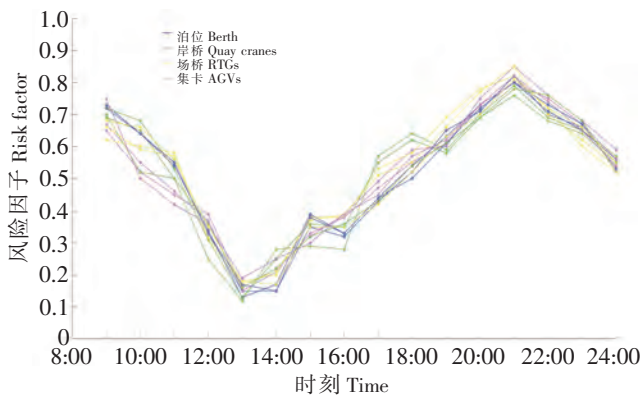


图 3 不同时间资源冲突仿真图

Fig.3 Simulation of resource conflicts at different times