

## 基于结构熵的集装箱码头物流系统有序性评价研究

吴志福 周 强 王文龙

(武汉理工大学物流工程学院 武汉 430063)

**摘要:**针对国内集装箱码头规划设计在组织结构优化方案比选方面缺乏科学定量评价工具的现状,运用结构熵理论和系统科学的思想,提出集装箱码头物流系统组织结构有序度的概念,并建立集装箱码头物流系统组织结构有序度评价模型,应用该评价模型分析比较不同组织结构设计方案的优劣,结果验证了评价模型的有效性,且适宜推广至其他类型码头应用。

**关键词:**集装箱码头;物流系统;组织结构;熵;有序度

**中图法分类号:**U691

**doi:**10.3963/j.issn.2095-3844.2018.06.035

## 0 引 言

现代国际货运物流要求以最短的时间和最低的成本完成货物转运,从而在激烈的国际物流行业竞争中占据优势。集装箱码头作为海上物流的重要节点,除了地理环境条件,作业效率也是码头竞争力的重要指标<sup>[1]</sup>。合理的集装箱码头物流系统组织结构决定了集装箱码头集疏运和装卸船作业的效率,保证了码头高效地生产作业,从而减少码头作业的人力、物力成本和时间。随着先进的信息化技术不断应用到港口物流服务中,信息流已然成为码头货物转运和资源调度有序进行的关键。及时、准确的信息流是充分发挥集装箱码头物流系统功能的关键,是系统稳定运行的重要保障。

我国港口码头规划设计大部分停留在依靠历史资料、专家经验和应用数理统计方法测算分析的状态<sup>[2]</sup>,新建港口在规划设计阶段,缺乏对系统结构设计的科学评价工具和比选依据,导致港口码头建成后,或生产能力达不到预期效果、或产能过剩而导致资源浪费现象。鉴于在集装箱码头物流系统组织结构评价和优化研究方面的空白,以现代系统科学思想和熵理论为依据,深入研究和解决集装箱码头物流系统复杂性问题的,运用结构熵理论分析集装箱码头物流系统组织结构,研

究成果为码头组织结构规划设计方案的比选提供参考决策,深刻结合了学术理论和工程实际应用,为集装箱码头工程设计提供新的思路。

## 1 集装箱码头物流系统结构与自组织机制

根据分形理论<sup>[3]</sup>,由若干个基本结构组成的网络构型,在赋予结构中各节点不同类型的功能后,形成复杂网络结构。分形理论自被提出以来已经成为了用来描述复杂网络结构的重要工具<sup>[4]</sup>,系统组织结构的演化与发展是一种分形网络结构的互动过程,该理论用来研究系统组织结构的复杂性具有重要意义。集装箱码头物流系统的复杂性主要体现在其系统内、外部环境的不确定性、码头平面布局网络结构的复杂性、系统生产组织结构的复杂性和码头作业流程的复杂性等<sup>[5]</sup>。

集装箱码头物流系统作为一个典型的复杂分形网络系统,其局部存在自相似性,整体上又存在不规则性,简单的局部自组织成复杂的整体。受自组织机制的推动,系统的组织结构在演化过程中由 U 型向 M 型转变,从而改善码头系统的协同效应和反应速度,避免过于复杂的组织结构造成管理不便和成本增加。

收稿日期:2018-09-28

吴志福(1993—):男,硕士生,主要研究领域为物流系统建模与分析

## 2 结构熵理论和集装箱码头物流系统有序度

### 2.1 结构熵理论

由熵概念的定义知,熵是用来定量描述通信过程中信息传输的信息源的不确定性、不规则性和不稳定性等特性的参量<sup>[6]</sup>,熵(entropy)、信息(information),以及有序性(order)之间存在着密切的关联关系.系统的结构熵随着内部组成元素的增多、结构层次的复杂而增大;而系统已知的信息量增多时,系统的熵值反而会减小,系统由无序变得有序.根据自组织机制原理<sup>[7]</sup>,集装箱码头物流系统的内部网络结构可以看作是一个自组织体,虽然演化过程十分复杂,但遵循则一定的秩序.因为其自身的自组织能力和环境适应性,所以在长久的演化过程中总是趋向优化、有序化方向发展.根据负熵理论可知<sup>[8]</sup>,只有通过引入外界的负熵,并能够消除系统内部的正熵时,系统才能走向有序化.在度量系统的结构熵时,将信息源在组织结构内部传递的不确定度分为信息在传递过程中是否及时的不确定性和信息传递前后是否一致的不确定性.

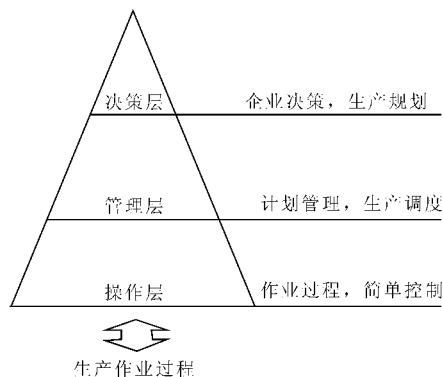
### 2.2 系统的有序度

系统组织结构的有序程度体现为系统内部信息交换的时效性和准确性,可以应用结构熵量化地描述系统的有序程度,不同组织结构的结构熵和有序度不同.在集装箱码头生产作业时,信息是连接码头各个节点的重要介质,快捷和准确地信息传递是整个系统有效运行、资源合理利用、作业效率提高的保障.应用结构熵理论对集装箱码头物流系统宏观层面——组织结构进行定量描述,计算不同系统的结构熵和有序度,进而比较和评价不同方案的优劣,可为工程实际应用提供借鉴,使宏观层面设计更加合理化.

## 3 基于结构熵的系统评价方法

通常将系统组织结构分为决策层、管理层和操作层三个层面(也存在四个层面的情况),见图1.决策层一般只有一个节点,管理层节点数由码头的设计结构和装卸工艺决定,操作层则为不同控制节点的直接控制下级节点.集装箱码头决策层为其码头本身的物流系统,管理层为信息系统、泊位系统、集箱/提箱系统、装/卸船系统、堆场系

统、路网系统等子系统,操作层为各子系统的控制单元.集装箱码头系统内部之间和系统与外部环境之间存在复杂的物质、能量、信息交换,决定了集装箱码头物流系统的组织结构和信息传递规则,系统组织结构中各元素之间进行信息传递的规则可被定义为集装箱码头物流系统有序度.



图系统组织结构层次图

根据系统的结构熵理论对集装箱码头物流系统结构进行描述<sup>[9-12]</sup>,定义其结构有序度为

$$R = 1 - \frac{H}{H_{\max}} \quad (1)$$

式中: $H$ 为系统的结构熵; $H_{\max}$ 为系统中的最大熵值.

$R$ 越大,表示该集装箱码头物流系统越有序,其结构越优. $H_{\max}$ 的值取决于系统内部的组成规模和组织结构的复杂程度,其表征着系统结构最无序的状态.若将结构熵与最大熵值比较,则表示为系统结构的无序度,即  $H/H_{\max}$ .

根据结构熵理论,集装箱码头物流系统的结构熵  $H$  定义为

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad (2)$$

式中: $p_i$ 为第  $i$  个系统状态出现的概率; $n$ 为状态的总数量.

由拉格朗日乘子法可得系统最大熵值为

$$H_{\max} = \lg n \quad (3)$$

### 3.1 系统的结构有序度

计算集装箱码头物流系统组织结构的有序度时,要综合考虑集装箱码头物流系统信息传递的时效有序度和质量有序度,对两者加权求和得到结构有序度,或称质效有序度为

$$R = \alpha R_t + \beta R_q \quad (4)$$

式中: $R_t$ 为集装箱码头物流系统组织结构的时效有序度; $R_q$ 为集装箱码头物流系统组织结构的质量有序度; $\alpha, \beta$ 分别为它们的权重.

### 3.2 系统的时效有序度

假设该图为集装箱码头物流系统组织结构,

系统结构层次为三层,总共有  $N$  个系统的基本要素,决策层要素个数一般取 1,管理层要素个数为  $k$ ,见图 2.

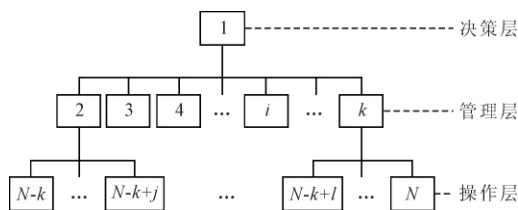


图2 集装箱码头物流系统组织结构示意图

其中方框内的标号“1”为第1个元素,线段连接的两个方框之间具有直接联系(或称直接信息交流)。集装箱码头物流系统中管理层为各子系统,它们之间的交互需要通过中控系统也就是决策层进行信息交换,所以图中结构仅有上下层级间的信息交互,而在实际中有些特定的系统会有横向的信息交互。

在某个时间段  $t_i$  内,图2中某一元素  $i$  向该物流系统中的其他元素  $j$  发出信号后,能否在  $t_i$  时间段内及时的收到相应的信息反馈的不确定性程度称为元素  $i$  和元素  $j$  之间信息联系的时效熵  $H_t(ij)$ 。该物流系统中,上下层级间任意两元素的联系时效熵  $H_t(ij)$  定义为

$$H_t(ij) = -p_t(ij) \lg p_t(ij) \quad (5)$$

式中:  $p_t(ij)$  为系统第  $ij$  个联系时效微观态出现的概率,  $p_t(ij) = L_{ij}/A_t$ , 其中:  $L_{ij}$  为该系统的组织结构中任意两个元素  $i, j$  之间的最小联系长度,若两个元素之间联系,则最短联系长度  $L_{ij}$  为 1,若需要经过一次中转,则  $L_{ij}$  为 2,以此类推,经过二次周转长度为 3,经过三次中转长度为 4;  $A_t$  为系统的时效微观态总数,  $A_t = \sum_i \sum_j L_{ij}$ 。

综上可得,集装箱码头物流系统总时效熵  $H_t$  为

$$H_t = \sum_i \sum_j H_t(ij) = \sum_i \sum_j p_t(ij) \lg p_t(ij) \quad (6)$$

则系统的时效有序度为  $R_t = 1 - H_t/H_{t/\max}$ 。

式中:系统最大时效熵  $H_{t/\max} = A_t$ 。

### 3.3 系统的质量有序度

用质量熵描述信息在传递过程中的准确与否,其值表示为信息传递质量的不确定性大小,即在单位时间段  $t_i$  内,元素  $i$  向该物流系统中的除本身外任意元素发出信息,对应的信息接收方收到信息后,发出的反馈信息与发送信息一致程度的不确定大小称为两元素  $i, j$  之间的质量熵  $H_q(ij)$ , 定义为

$$H_q(ij) = -p_q(ij) \lg p_q(ij) \quad (7)$$

式中:  $p_q(ij)$  为系统第  $ij$  个联系质量微观态出现的概率,  $p_q(ij) = K_i/A_q$ 。其中:  $K_i$  为该物流系统中与元素  $i$  有直接联系的元素数量,称为元素联系幅度;  $A_q$  为系统的质量微观总数,  $A_q = \sum_i K_i$ 。

综上可得,集装箱码头物流系统的质量熵为

$$H_q = \sum_i \sum_j H_q(ij) = \sum_i \sum_j p_q(ij) \lg p_q(ij) \quad (8)$$

则系统的质量有序度为其中,系统最大质量熵。

## 4 算 例

图3为传统型和新型集装箱码头物流系统的组织结构图。

将图3简化为元素—结构图,见图4。

应用上述的结构熵评价模型对两种集装箱码头物流系统结构进行结构熵和有序度计算,得到两个系统的时效熵和时效有序度、质量熵和质量有序度,见表1~4。

表1 传统型系统组织结构时效熵和有序度

联系长度	联系标号	时效熵	合计
1	1-2, 1-3, ..., 1-8	0.082 2	30
	2-9, 2-10, ..., 2-13		
	3-14, 3-15		
	4-16, 4-17, 4-18		
	5-19, 5-20, 5-21		
	6-22, 6-23, 6-24		
	7-25, 7-26, 7-27		
	8-28, 8-29, 8-30, 8-31		
2	1-9, 1-10, ..., 1-31	0.138 1	23
总时效熵	5.642 3	时效有序度	0.096 9

表2 新型系统组织结构时效熵和有序度

联系长度	联系标号	时效熵	合计
1	1-2, 1-3, ..., 1-6	0.089 5	22
	2-7, 2-8, 2-9		
	3-10, 3-11		
	4-12, 4-13, 4-14		
	5-15, 5-16		
	6-17, 6-18, 6-19		
2	7-20, 7-21, 7-22, 7-23	0.149 6	17
	1-7, 1-8, ..., 1-19		
	2-20, 2-21, 2-22, 2-23		
3	1-20, 1-21, 1-22, 1-23	0.198 6	4
总时效熵	5.306 6	时效有序度	0.128 2

表3 传统型系统组织结构质量熵

联系数量	元素	质量熵	合计
1	9, 10, ..., 31	0.098 4	23
3	3	0.216 1	1
4	4, 5, 6, 7	0.260 5	4
5	8	0.298 7	1
6	2	0.332 2	1
7	1	0.361 6	1
总质量熵	4.513 8	质量有序度	0.235

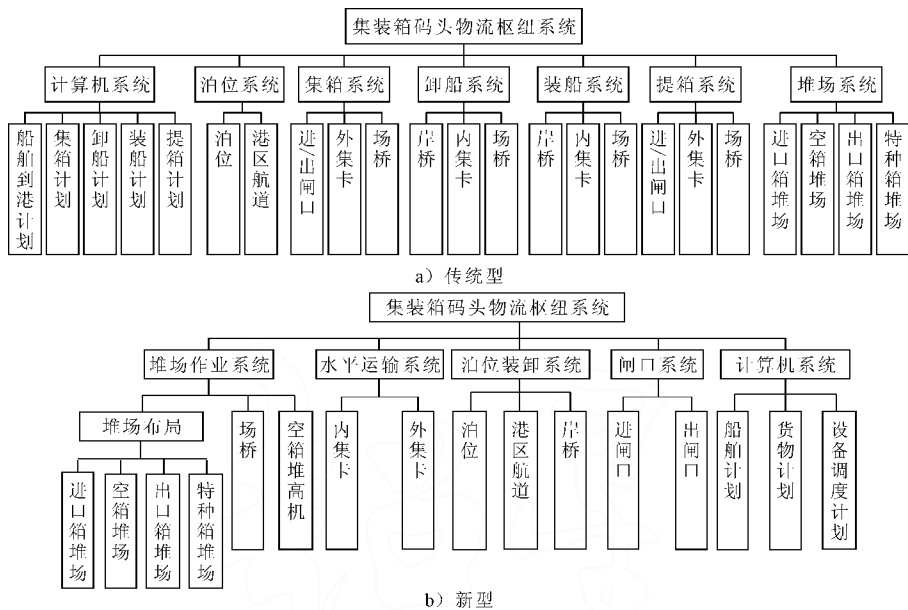


图 3 系统组织结构

表 4 新型系统组织结构质量熵

联系数量	元素	质量熵	合计
1	8,9,...,23	0.124	16
3	3,5	0.264 1	2
4	2,4,6	0.314 5	3
5	1,7	0.356 5	2
总质量熵	4.17	质量有序度	0.236

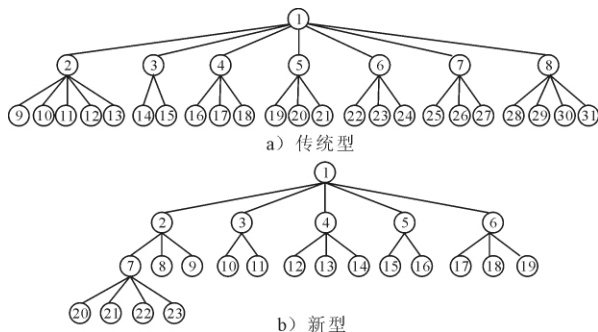


图 4 系统组织结构简化图

然后根据公式  $R = \alpha R_t + \beta R_q$  计算结构有序度,为不失一般性,在系统中信息传递过程中时效熵和质量熵权重  $\alpha$  和  $\beta$  都取 0.5,则两个物流系统结构的计算结果见表 5.在实际应用评价模型时,可以根据港口码头对两者的偏好和专家意见对权重进行针对性的取值.

表 5 两种集装箱码头物流系统结构熵比较

系统结构	时效熵	质量熵	时效有序度	质量有序度	结构有序度
传统	5.642 3	4.514	0.096 9	0.235	0.166
新型	5.306 6	4.17	0.128 2	0.236	0.182

对比两种系统结构的计算结果,说明新型系统结构在信息交流的时效和质量方面皆优于传统系统结构,新型物流系统的时效有序度高于传统

型物流系统 32%,说明新型结构信息传输更为及时有效;从质量有序度可以得到两个结构的信息传递的准确性(或一致性)接近相同,但是新型结构的质量熵低于传统结构,略优于传统结构;新型结构的结构有序度高于传统结构 9.7%.此有序度计算结果说明新型结构整体上和某些局部上优于传统结构,若不考虑其他影响因素和权重问题,新型结构是两者的优选方案.但是在集装箱码头物流系统构建或优选时可以从信息论方面获得一些理论支持.虽然在工程实际中,可能会遇到两个方案的时效有序度和质量有序度一大一小的情况,此时则需根据集装箱码头物流系统实际生产作业情况对时效和质量的偏好,适当改变两者的权重和或将系统结构拆分为货物流、信息流、车流等结构并重新建立结构熵模型,获得更完善的有序度评价模型.

## 5 结 束 语

基于系统科学和耗散结构理论,对集装箱码头物流系统组织结构的有序度评价研究,并建立集装箱码头物流系统有序度评价模型,在算例中,应用结构熵模型计算传统型和新型集装箱码头物流系统的组织结构有序度,分析和比较不同系统组织结构的优劣,并验证了该模型的有效性.集装箱码头物流系统作为一个耗散结构,它的“熵增”导因相当复杂,若从微观层次考虑难以实现,这也是该评价模型的局限所在.如果系统的功能和目标存在较大差异时,评价模型需要进一步的完善

和系统仿真验证,模型中的权重取值也需要进一步研究和完善.此外,该有序度评价模型不仅可以用于集装箱码头物流系统,还可以推广到煤炭或铁矿等干散货码头、油品码头、件杂货码头等物流系统结构方案的评价和比较.

#### 参考文献

- [1] 王文涛. 自动化集装箱码头作业效率评估研究[D]. 厦门:集美大学,2017.
- [2] 付博新. 集装箱港口规划领域的若干理论及方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [3] BAI Y N. A key heterogeneous structure of fractal networks based on inverse renormalization scheme [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018,499:67-74.
- [4] 段德忠. 基于分形理论的公交网络空间结构复杂性研究:以武汉城市中心城区为例[J]. 地理与地理信息科学,2013,29(2):66-71.
- [5] 党小红. 面向平面布置的集装箱码头物流系统复杂性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [6] 宁方华,陈子辰,熊励. 熵理论在物流协同中的应用研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2006,40(10):1705-1708.
- [7] 张卫. 基于无标度网的制造业服务化系统自组织研究[J]. 高技术通讯,2013,23(8):875-882.
- [8] 单丽辉,张仲义. 基于耗散结构的物流网络系统运作模式分析[J]. 物流科技,2014(12):86-89.
- [9] 李电生,夏国建. 基于结构熵理论的供应链系统有序度评价研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版),2008,7(4):40-43.
- [10] 张志峰,肖人彬. 基于结构熵的生产系统有序性评价的实证研究[J]. 机械工程学报,2007,43(6):62-67.
- [11] WANG H. Analysis on the structure of regional industrial complex system and the measurement on orderly degree of the system [C]. International Conference on Management and Service Science, 2009(1):1-4.
- [12] SONG Z T. Order degree evaluation of information system based on improved structural entropy[J]. Open Journal of Business & Management, 2015,3(3):235-242.

## Study on Orderliness Evaluation of Container Terminal Logistics System Based on Structural Entropy

WU Zhifu ZHOU Qiang WANG Wenlong

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** In view of the lack of scientific and quantitative evaluation tools in comparison and selection of organizational structure optimization schemes in domestic container terminal planning and design, this paper put forward the concept of organizational structure order of container terminal logistics system and established an evaluation model of organizational structure order of container terminal logistics system by using the theory of structural entropy and the idea of system science. Finally, the evaluation model was used to analyze and compare the advantages and disadvantages of different organizational structure design schemes. The results verify the effectiveness of the evaluation model and it is suitable for other types of wharf applications.

**Key words:** container terminal; logistics system; organizational structure; entropy; degree of order