

# 自动化集装箱码头岸边装卸与堆场作业的耦合

辛永宝 郭燕 周强 管政霖

武汉理工大学 武汉 430063

**摘要:** 引入岸边装卸与堆场作业的耦合概念, 分析了岸边装卸与堆场作业的耦合作用机理, 提出一种评价自动化码头装卸工艺的新方法。根据自动化码头装卸工艺特点, 提出耦合度评价指标体系, 并基于层次分析法 (AHP) 求出各指标的权重, 建立了岸边装卸与堆场作业的耦合度评价模型, 并对几种典型自动化码头耦合度进行了评价。

**Abstract:** In the paper, the concept of the coupling between quayside handling and yard operations is introduced, and the coupling mechanism is analyzed. Moreover, a new method for evaluating the handling process at automated terminal is proposed. A coupling degree evaluation index system is put forward based on the characteristics of the handling process, and the weight of each index is calculated by using Analytic Hierarchy Process (AHP). The coupling degree evaluation model of quayside handling and yard operations is established, which is used to evaluate the coupling degree of several typical automated terminals.

**关键词:** 自动化码头; 耦合机理; 评价体系; 耦合度

**Keywords:** automated terminal; coupling mechanism; evaluation system; coupling degree.

中图分类号: U653.92 文献标识码: A 文章编号: 1001-0785 (2018) 06-0069-05

## 0 引言

随着集装箱船舶的大型化发展, 劳动力成本增加, 自动化、计算机技术、通信技术以及码头装卸技术的进步, 使高效智能的自动化码头成为全球集装箱码头发展的趋势, 同时由于集装箱船舶装卸作业具有动态性及离散随机性的特点, 给码头堆场布局规划及装卸工艺方案的设计带来一定的难度<sup>[1]</sup>。自动化集装箱码头作业系统由岸边装卸与堆场作业两大系统构成, 在码头作业过程中, 两个装卸系统高效智能地串联成动态整体, 一直在交互耦合状态, 协同配合, 共同完成船舶装卸作业。因此, 岸边装卸与堆场作业之间是否能够有序地协调配合工作, 将是影响整个码头运转效能充分发挥的关键因素。目前国内外相关学者也对自动化码头做了大量研究, 罗勋杰<sup>[2]</sup>对自动化码头水平运输方式进行了定性定量的对比分析, 郑见桦<sup>[3]</sup>等多种自动化码头装卸工艺系统进行了对比分析, 杨春霞<sup>[4]</sup>等对集装箱码头岸桥一泊位分配进行了耦合优化。但对自动化码头岸边装卸与堆场作业两个系统间的耦合问题鲜有研究, 缺少一种评价自动化码头装卸系统耦合度的系统方法。

本文将耦合和耦合度的概念引入自动化集装箱码头

装卸工艺系统研究中, 并提出了耦合度评价指标, 构建了岸边装卸与堆场作业系统的耦合度评价模型, 提出一种评价自动化码头装卸工艺性能的新方法, 研究了岸边装卸与堆场作业间的协同耦合状态, 并对常见的自动化集装箱码头装卸工艺系统的耦合度进行了评价分析。

## 1 耦合理论

### 1.1 耦合的内涵

对于自动化集装箱码头岸边装卸与堆场作业的耦合概念, 目前学界并没有明确的说法, 处于“仁者见仁、智者见智”的状态。耦合是物理学中的概念, 它是指两个或两个以上的系统、模块或运动方式彼此间通过各种作用而互相影响的现象<sup>[5]</sup>。而从广义的角度来说, 任何事物、系统之间只要存在某种关联, 都可以认为是一种耦合关系, 因此, 耦合理论应用广泛, 在多个学科领域均有研究, 是分析开放复杂系统中各个子系统相互关系最有效的方法之一。自动化码头装卸工艺系统各作业设备之间相互关联, 相互制约, 是一个典型的多系统交互耦合的开放复杂系统, 因此认为岸边装卸系统与堆场作业系统之间存在耦合关系, 即岸边装卸系统与堆场作业

系统之间紧密联系、相辅相成，两者相互协调配合共同为码头运营服务，其耦合作用机制如图 1 所示。

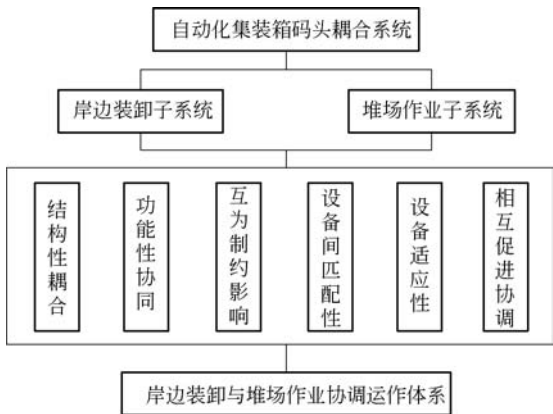


图 1 岸边装卸与堆场作业耦合关联作用机制

1.2 耦合度

耦合度是指在耦合系统中，各子系统之间以及组成系统的各元素之间相互作用、相互依赖、彼此影响的总强度<sup>[6]</sup>。岸边装卸与堆场作业子系统之间的耦合度，体现了岸边装卸工艺系统与堆场作业工艺系统间相互匹配的程度和相互作用强度的大小。耦合度越小，说明两个系统之间越不相关，岸边装卸工艺与堆场作业工艺间的协调匹配性有待进一步提高，即码头的作业能力得不到有效发挥；耦合度越大，说明岸边装卸系统与堆场作业

系统之间的耦合程度越高，此时岸边装卸能力与堆场作业能力相互匹配、相互促进、协调发展，码头综合作业能力也就越佳。

2 岸边装卸与堆场作业的耦合度评价模型

2.1 指标体系的建构

自动化集装箱码头理想的装卸工艺系统需要装卸设备间结构性耦合、功能性协同，各子系统作业能力匹配性能好，能适应多种突发因子对码头正常作业造成的影响，为了能够很好地评价自动化码头岸边装卸与堆场作业之间的耦合程度，在构建耦合度评价指标时应遵循以下原则：1) 系统地选取评价指标，即所选取的指标能覆盖岸边装卸与堆场作业的各个方面，使得评价结果能全面、综合地反映码头工艺系统的总体情况。2) 评价指标在码头工艺系统中要最具代表性和说服力，减少不必要、不合适指标的使用，充分体现岸边装卸与堆场作业的耦合规律。3) 评价指标要具有实用性，所建立的指标资料易收集、数据规范、含义明确，评价方法不可太复杂，指标体系尽量简化。4) 所建立的指标要有广泛的适应性，即所选指标能反映不同类型自动化码头的共同特点。基于以上原则，综合考虑码头作业过程中的内禀随机性，总结出以下评价指标<sup>[7]</sup>，如表 1 所示。

表 1 岸边装卸与堆场作业耦合度评价指标体系

序参量	评价指标	主要评价内容
岸边装卸 A1	岸边集装箱起重机类型 A11	不同类型岸边集装箱起重机效率与堆场车辆匹配性不同，对码头作业能力贡献不同
	水平运输车辆类型 A12	运输车辆类型不同，与岸边集装箱起重机配比、效率都不同，对交接区耦合作业及岸边装卸效率影响不同
	移动缓冲区数量 A13	集装箱在岸边停留位置的数量即水平运输车辆的数量是应对随机干扰、保证码头正常作业的指标之一
	运输车辆灵活性 A14	水平运输车辆路径是否可供选择可反映系统灵活性、柔性及应对拥堵的能力
堆场作业 A2	转接次数 A21	转接次数即装卸运输环节的多少可反映系统工艺性能的好坏
	是否同平面作业 A22	多平面作业可有效解决作业任务冲突，提高作业能力
	抓放次数 A23	集装箱从运输车辆到堆场的抓放次数对系统可靠性产生影响
	水平移动次数 A24	堆场系统理想设计应满足最短路径原则，可反映堆场设计的合理性

## 2.2 指标权重计算

在计算指标权重之前,需要先建立判断矩阵。

判断矩阵  $A=(b_{ij})_{n \times n}$  具有以下属性:  $b_{ij} > 0$ ,

$b_{ij}=1/b_{ji}(i,j=1,2,\cdots,n)$ , 其中  $b_{ij}$  表示指标  $b_i$  与  $b_j$  对于上一个指标重要性的比例标度。判断矩阵的值反映了各项指标的相对重要性,根据德尔菲法,采用 1~9 的比例标度来对评价指标重要性程度进行赋值。若指标  $b_i$  与  $b_j$  的重要性之比为  $b_{ij}$ ,那么指标  $b_j$  与  $b_i$  的重要性之比为  $b_{ji}=1/b_{ij}$ ,如表 2 所示。

表 2 1~9 标度值表

比例标度 $b_{ij}$	含义
1	表示两个指标相比,具有同样的重要性
3	表示两个指标相比,前者比后者稍微重要
5	表示两个指标相比,前者比后者明显重要
7	表示两个指标相比,前者比后者更加重要
9	表示两个指标相比,前者比后者极为重要
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值

运用层次分析法(AHP)<sup>[8]</sup>,对各项关联指标之间的重要性进行比较,邀请来自学校、港口的相关教授、专家对目标层进行评价打分,然后建立判断矩阵  $A_1$  和  $A_2$ 。岸边装卸与堆场作业的判断矩阵表达式分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 2 \\ 1/3 & 1 & 5 & 1/3 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1/2 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 2 & 1/3 & 1/7 \\ 5 & 1 & 5 & 3 & 1/2 \\ 1/2 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 2 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵  $A$  求解特征根:  $AW=\lambda_{\max}W$ , 所得特征向量  $W$  经标准化后作为指标的权重进行排序,由于准确特征值及特征向量的求解十分困难,一般只能得到

近似解,因此,采用几何平均法求解,即对矩阵的每一列进行归一化处理,然后将所得的新向量每行做乘积,每一个分量开  $n$  次方,再将所得向量进行归一化处理,可得相应指标权重  $\omega_i$ ,计算公式如下

$$\omega_i = \frac{(\prod_{j=1}^n (A_{ij} / \sum_{j=1}^n A_{ij}))^n}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n (A_{ij} / \sum_{j=1}^n A_{ij}))} \quad (1)$$

## 2.3 耦合度函数模型构建

### 2.3.1 功效函数

设变量  $u_i(i=1,2,\cdots,n)$  是岸边装卸或堆场作业系统的序参量,  $u_{ij}$  为第  $i$  个序参量的第  $j$  个指标的贡献值,  $X_{ij}(j=1,2,\cdots,n)$  是评价指标的数值,  $B_{ij}$ 、 $C_{ij}$  是耦合系统评价指标的上、下限值。采用李克量表法中的五级量表,设置 1~5 共 5 个数字表示,1 表示性能最差,5 表示性能最佳,然后请学校、港口的行业专家对统计的评价指标进行打分,李克量表中的最高值和最低值代表评价指标的上下限值,下限为 1,上限为 5。

岸边装卸和堆场作业的功效函数

$$u_{ij} = \begin{cases} (X_{ij}-C_{ij})/(B_{ij}-C_{ij}), & u_{ij} \text{ 具有正功效} \\ (B_{ij}-X_{ij})/(B_{ij}-C_{ij}), & u_{ij} \text{ 具有负功效} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_{ij}$  反映了各项指标达到目标值的满意程度,  $0 \leq u_{ij} \leq 1$ , 趋于 0 为最不满意, 趋于 1 为最满意。

岸边装卸与堆场作业是自动化码头中两个不同而又相互作用的子系统,子系统内各个指标的作用程度可通过集成方法论来实现,本文采取线性加权法和

$$u_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} u_{ij}, \quad \sum_{j=1}^n \omega_{ij} = 1 \quad (3)$$

式中:  $u_i$  为子系统对总系统的贡献参量;  $\omega_{ij}$  为各个指标的权重,其值通过式(1)进行计算。

### 2.3.2 耦合度函数

通过参考物理学中的容量耦合概念和容量耦合系数模型,可以推广得到多个系统相互作用的耦合度模型

$$C_n = \left\{ (u_1 \cdot u_2 \cdots u_n) / \left[ \prod (u_i + u_j) \right] \right\}^{1/n} \quad (4)$$

根据上式，可以得到岸边装卸与堆场作业的耦合度函数

$$C = \left\{ (u_1 \cdot u_2) / [(u_1 + u_2) \cdot (u_1 + u_2)] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

式中：耦合度值  $C \in [0,1]$ ，当  $C = 1$  时，岸边装卸与堆场作业的耦合度最大，说明两个子系统之间达到了良性耦合，其配合作业可发挥较大的作业能力；当  $C = 0$  时，岸边装卸与堆场作业的耦合度最小，两个子系统处于无关状态，作业能力受到限制。

3 岸边装卸与堆场作业耦合度评价实证研究

3.1 典型自动化码头的工艺系统分析

在提出自动化集装箱码头岸边装卸与堆场作业系统的耦合度评价模型后，应用该模型对目前世界上已投产或在建的主要自动化集装箱码头进行耦合度评价。在深入分析研究世界主要自动化集装箱码头装卸工艺的基础上，统计得到其工艺系统参数如表 2 所示。

表 2 自动化码头装卸工艺系统评价指标对比表

工艺类型	岸边装卸评价指标				堆场作业评价指标				
	岸桥类型	水平运输工具类型	移动缓冲区数量	运输工具灵活性	转接次数	是否同平面作业	抓放次数	水平移动次数	自动化实现性
岸桥—集卡—自动轨道吊	单小车双 20 英尺	集卡	3 ~ 7	优	2	是	4	3	差
岸桥—人工跨运车—自动轨道吊	单小车双 20 英尺	人工跨运车	2 ~ 3	优	2	是	8	5	中
岸桥—AGV—自动轨道吊	单小车双 20 英尺	AGV	3 ~ 5	良	2	是	4	4	良
岸桥—L-AGV—自动轨道吊	单小车双 20 英尺	L-AGV	3 ~ 4	良	2	是	4	4	良
双小车岸桥—AGV—自动轨道吊	双小单车 40 英尺	AGV	5 ~ 7	良	2	是	6	4	良
岸桥—垂直高架牵引小车—自动轨道吊	单小车双 40 英尺	牵引小车	2	差	3	否	6	4	优
岸桥—平行高架牵引小车—自动轨道吊	单小车双 40 英尺	牵引小车	2	差	3	否	6	5	优
岸桥—自动跨运车—自动轨道吊	单小车双 20 英尺	自动跨运车	2 ~ 3	良	2	是	8	5	良
双小车岸桥—立体轨道穿梭系统—自动轨道吊	双小单车 40 英尺	轨道小车	5	中	3 ~ 4	否	4 ~ 6	2 ~ 3	优

注：以上参数均以一台岸桥、一次完整装卸对应的作业情况统计。

3.2 耦合度计算及评价

首先，运用李克量表法对表 2 中不同类型自动化码头工艺系统各个评价指标进行专家打分，然后通过式(1)对岸边装卸子系统与堆场作业子系统的评价指标权重分别进行计算，结果如表 3 所示。

对表 2 中世界主要自动化集装箱码头工艺系统耦合度进行计算，结果如表 4 所示。

综合以上计算结果，分析可得：

1) 在岸边装卸与堆场作业评价体系的综合评价指

表 3 评价指标权重计算结果

序参量	评价指标	权重
岸边装卸	岸桥类型	0.288 9
	水平运输工具类型	0.191 1
	移动缓冲区数量	0.262 9
	运输工具灵活性	0.257 1
堆场作业	转接次数	0.147 9
	是否同平面作业	0.224 9
	抓放次数	0.178 5
	水平移动次数	0.181 3
	自动化实现性	0.267 4



标中，岸桥类型在岸边装卸系统所占权重最高，即对岸边装卸作业效率影响最大；自动化实现性和是否同平面作业在堆场作业系统中占的权重较大，堆场自动化的实现方式是影响堆场作业效率的关键因素。

2) 表 4 中计算的几种自动化码头都是已建成或在建的码头，经过了各种试验与检验，耦合度都处于 0.4~0.5 区间，耦合关系良好，但岸边装卸与堆场作业的匹配程度还有进一步提升的空间。

表 4 岸边装卸与堆场作业耦合度计算结果

工艺类型	岸边装卸序参量 $u_1$	堆场作业序参量 $u_2$	耦合度 $C$
岸桥—集卡—自动轨道吊	0.592 2	0.473 3	0.496 9
岸桥—人工跨运车—自动轨道吊	0.495 1	0.256 4	0.488 5
岸桥—AGV—自动轨道吊	0.557 8	0.673 8	0.497 8
岸桥—L-AGV—自动轨道吊	0.639 8	0.380 8	0.499 2
双小车岸桥—AGV—自动轨道吊	0.702 2	0.592 2	0.498 2
岸桥—垂直高架牵引小车—自动轨道吊	0.399 8	0.744 6	0.486 1
岸桥—平行高架牵引小车—自动轨道吊	0.399 8	0.599 3	0.489 9
岸桥—自动跨运车—自动轨道吊	0.378 6	0.502 3	0.495 0
双小车岸桥—立体轨道穿梭系统—自动轨道吊	0.740 0	0.699 0	0.499 8

4 结语

1) 通过分析岸边装卸与堆场作业关系表明，岸边装卸与堆场作业之间存在着交互耦合关系，它们的耦合协调程度是自动化码头装卸工艺系统性能好坏的关键。

2) 在深入分析自动化集装箱码头装卸工艺研究成果的基础上，运用 AHP 进行耦合度指标体系及耦合度模型的建构，其评价过程受外界影响的干预性较小，简单易行且清晰明确，可作为评价自动化码头装卸工艺性能的重要手段。

3) 运用所建立的模型对自动化码头耦合度进行评价，岸桥类型、是否同平面作业等指标所占权重较大，计算结果表明其耦合关系良好。通过对码头工艺系统耦合度的评价，可为码头规划设计者提供新方法、新思路，具有一定参考价值。

3) 双小车岸桥—立体轨道穿梭系统—自动轨道吊工艺耦合度最高，其序参量  $u_1$ 、 $u_2$  的值也较为接近，岸边装卸与堆场作业系统对码头整体作业效率发挥的作用相当，二者匹配较好，较其他码头工艺要好。

4) 岸桥—自动跨运车—自动轨道吊等工艺类型的序参量  $u_1$ 、 $u_2$  的值相差较大，即它们处于低度协调耦合状态，岸边装卸与堆场作业的目标一致性较差，相互限制了对方效率的提高，协调程度还需加强。

参考文献

[1] 罗勋杰. 全自动化集装箱码头水平运输式对比 [J]. 水运工程, 2016(9): 76-82.

[2] 何继红, 林浩, 姜桥. 自动化集装箱码头装卸工艺设计 [J]. 中国港湾建设, 2016, 36(4): 67-70.  
[3] 郑见梓, 李海波, 谢文宁, 等. 自动化集装箱码头装卸工艺系统比较研究 [J]. 水运科学研究, 2011(2): 26-33.  
[4] 杨泰霞, 王诺, 杨华龙. 集装箱码头泊位—岸桥分配耦合优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2 270-2 277.  
[5] 孙启鹏, 高捷, 邹海波, 等. 通道运输方式的耦合机理及耦合协调度模型 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 84-89.  
[6] Su Y, Wang F, An X. Coupling Mechanism and Coupling Degree Measurement Model of Shipbuilding Industry Cluster [J]. Polish Maritime Research, 2016, 23(s1).  
[7] 韩浩, 安津晖, 任超, 等. 自动化集装箱码头整体装卸工艺设计 [J]. 中国港口, 2016(6): 56-58.  
[8] 章俊华. 规划设计学中的调查分析法与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

作者: 辛永宝  
电子邮箱: 917193254@qq.com  
收稿日期: 2017-11-14