



# 现代煤炭港口卸车联合调度优化问题研究\*

刘文远<sup>1</sup>, 苏飞<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 国投中煤同煤京唐港口有限公司, 河北 唐山 063611)

**摘要:** 现代煤炭港口由传统装卸服务向综合物流服务转型过程中, 对港口整体调度的智能性与效率性要求提升到新高度, 因此需要以系统论的观点解决煤炭港口的联合调度优化问题。针对影响卸车调度的关键问题, 综合考虑车流集中到达、列车限制性调度等因素, 以现代煤炭港口生产工艺流程为基础, 重点研究现代煤炭港口卸车联合调度优化, 构建以待车时间最短、作业时间最短且关联堆场作业动态的卸车联合调度优化模型(火车-翻车机-堆场联合调度优化模型), 运用相应优化策略, 分析优化模型, 实现卸车调度各环节智能化的最优解决途径。

**关键词:** 煤炭港口; 联合调度; 卸车作业; 禁忌搜索算法

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0101-06

## Unloading joint scheduling optimization in modern coal port

LIU Wen-yuan<sup>1</sup>, SU Fei<sup>1,2</sup>

(1. School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. SDIC Coal with Coal Jingtang Port Co., Ltd., Tangshan 063611, China)

**Abstract:** In the process of transformation from the traditional handling service to the comprehensive logistics service of the modern coal port, port overall scheduling requires more intelligent and efficient, so the coal port of joint scheduling optimization needs to be solved by the system theory. To counter the key problems affecting unloading scheduling, considering traffic concentration reached, train scheduling factors such as restriction, on the basis of modern coal port production process, focusing on the unloading joint scheduling optimization of modern coal ports, we build the model for the shortest waiting time, the shortest operation time, and the shortest dynamic operation time associated yard operation (the train-car dumper-yard joint scheduling optimization model). Using corresponding optimization strategy, we analyze the optimization model and realize the optimal intelligent unloading scheduling of each link.

**Keywords:** coal port; joint scheduling; unloading operation; tabu search algorithm

港口的煤炭装卸作业是影响煤炭在港时间的重要因素。有竞争力的煤炭港口实质上体现在服务水平高低的较量上, 要想提高通过能力和服务水平就必须重视港口作业效率, 货物的在港时间长短往往是港口效率高低的一种体现, 因此, 研究卸车调度系统的作业时间及效率对服务能力和港口通过能力的提升意义重大。本文着重研究煤炭港口站卸车方式、卸车时间最短的数学模型、用禁忌搜索

算法进行求解。最后的算例对模型和算法进行了有效验证, 为港口加快卸车效率、提高车站调度智能化水平提供了一种较好的解决途径。

## 1 问题的提出

### 1.1 现代煤炭港口卸车调度过程

煤炭港口卸车调度是指铁路部门根据相关卸车部门的要车计划向港口发车, 同时向港口传递

收稿日期: 2014-09-17

\*基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(15457627D, 14457667D)

作者简介: 刘文远(1968—), 男, 教授, 从事信息化、港口物流、海上交通与口岸管理等。

列车相关信息，列车进入港口后，由港站办理相关手续，卸车部门根据煤炭种类、堆场存放情况和船舶预报分配到各卸车单位，各单位卸车指导班大多根据《昼夜卸车计划》进行翻卸，然后由皮带机将煤炭运至堆场，由堆料机将煤炭堆放在相关煤种的垛位上<sup>[1-2]</sup>。这一过程主要由翻车机、堆料机、皮带机完成。

火车到达港口后，铁路发来入港手续，港口相关人员根据入港手续及翻车机状态、皮带机状态，堆场作业状态，船舶预报等情况，调度车辆进入车间进行翻车作业。考虑皮带机，对应堆场的空闲，合理安排次序，使得翻卸车作业总时间最短。

港口运输作为目前我国最主要的煤炭输出形式，其煤炭的卸车调度系统对整个煤炭物流作业组织效率的提高起着非常重要的作用<sup>[3]</sup>。卸车调度的优化使港路双方组织生产具有全局性、前瞻性、时效性、周密性，从而实现均衡运输。基于供应链思想的卸车调度的智能优化可以为卸车作业调度提供准确的依据，减少工作人员工作强度，提高工作效率，降低生产成本，提高企业竞争力。

### 1.2 卸车调度存在问题

现代煤炭港口除传统装卸业务，已开始逐步拓展煤炭物流增值业务，其发展基础在于更规范、智能的港口调度体系，以及更具效率的调度能力，该趋势及煤炭吞吐量的连续提升给煤炭港口的生产调度增加了压力，相应地也给煤炭港口管理人员带来了新的难题，即如何保证调度效率以及如何有效进行调度决策。

另外，现代煤炭港口的调度过程属于复杂的离散事件系统，针对卸车过程的联合调度优化成果相对较少，如何从微观视角系统分析卸车调度过程中列车-翻车机-堆场间的关系，保证卸车作业过程的效率最大化是亟待解决的问题。

与此同时，国内各大港口目前面临国内经济增速放缓、煤炭市场需求不旺、矿方存煤下降和电厂存煤上升的市场状态，港口急需改善装卸效率和堆存能力，最大限度保证卸车环节进行有效

调度，提高调度系统的信息化程度。

综合上述存在的问题，当前煤炭港口卸车联合调度优化研究基础薄弱、联合调度智能化不足，且亟需调度各环节的充分对接、信息整合与协同管理，因此，建立煤炭港口卸车联合调度优化模型极具现实意义。

## 2 构建煤炭港口卸车调度优化模型

### 2.1 卸车联合调度系统分析

卸车调度环节所涉及作业子系统包括：翻车机卸车系统、皮带输送系统、堆场堆存系统、管理监测系统等。作业设备包括：翻车机、卡车、堆取料机、皮带机等，构成卸车工作实体<sup>[4]</sup>，见图 1。

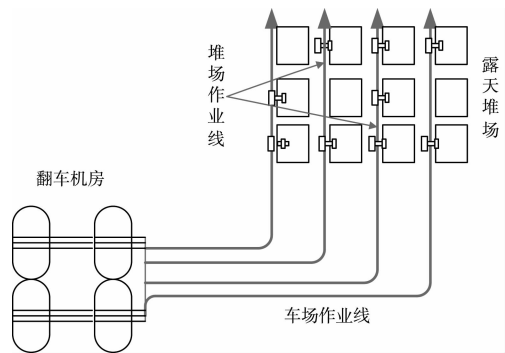


图 1 煤炭码头卸车调度基本组成

卸车调度过程计划包括：要车计划、优先进港计划、卸车计划，作业内容包括：卸车计划作业、对位作业、翻车作业、牵空作业。4 个期量标准：对位时间、翻车时间、牵空时间、对重时间。根据流程的作业顺序及工作设备（翻车机 CD，皮带机 BF、BH、BD，堆料机 S）将流程分为翻卸、输送、堆料 3 个节点进行具体分析，翻卸环节包括翻车机 CD 和皮带机 BF 两部分，输送环节指皮带机 BH 的运行情况，堆料环节包括皮带机 BD 和堆料机 S，见图 2。

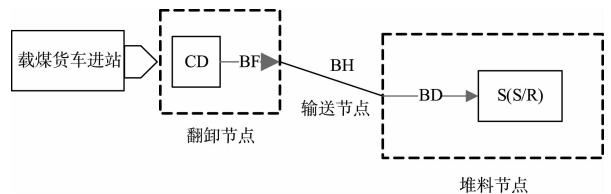


图 2 卸车系统流程节点

列车进港后, 根据之前制定的卸车计划进行路港交接, 如果信息与卸车计划不符则需要调整卸车计划, 如果与卸车计划一致则准备卸车作业流程, 准备就绪后进行对位作业, 翻车机进行翻车作业, 在卸车

过程中同时进行卸车采样并根据客户的要求进行必要的筛分作业, 经进场皮带机运输, 由堆取料机进行堆料作业将煤炭堆至相应垛位, 最后对列车空车厢进行牵空作业以便下列车完成卸车作业过程, 见图 3。

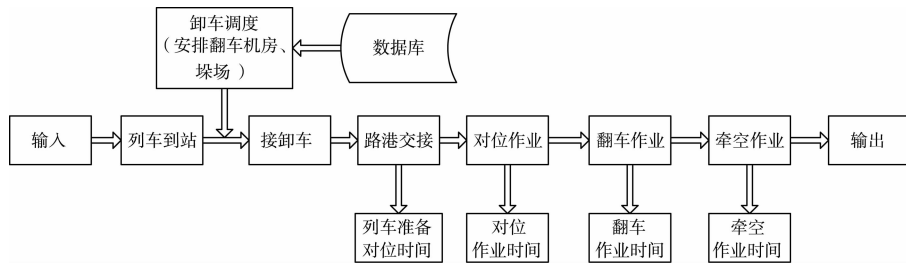


图 3 卸车系统流程及花费时间

本文的卸车调度系统属于联合调度过程, 综合考虑列车-翻车机-堆场的作用与关系, 其中堆场属于复杂的系统工程, 卸车作业与堆场堆存构成一个完整的卸车联合调度体系, 堆场作为其中重要组成, 其主要影响因素包括: 堆场堆存计划、堆场作业调度、堆场通过能力等。

### 2.2 火车-翻车机房-堆场联合调度优化模型

卸车联合调度综合考虑列车进港、煤种、堆场空闲、皮带机空闲、船舶预报等情况执行调度作业, 其中将堆取料机作业次序纳入分析指标范畴是进行卸车联合调度优化的重要前提<sup>[5]</sup>, 因此, 针对堆场作业现存的堆取料机空转时间过长, 导致堆取料作业效率低、堆取料机利用率不高的问题, 建立煤炭堆场作业数学模型。为简化问题、更好地用数学模型描述现场调度, 先做如下规定:

- 1) 对堆场垛位  $k$ 、火车  $i$ 、翻车机  $j$  只作业一次。
- 2) 翻车机  $j$  对垛位  $k$  作业时, 第  $j+1$  翻车机不得对垛位  $k$  作业, 防止堆取料机发生流程冲突。
- 3) 火车  $i$  卸车时对应的翻车机立即对相应的垛位  $k$  作业。
- 4) 每列火车必须被服务且仅能被服务一次。
- 5) 1 列回车只装载 1 种类型的煤炭, 要堆放煤种位置集合为:  $F = \{F_k \mid k = 1, 2, 3, \dots, p\}$ 。

设  $Q_i$  为火车  $i$  可选择的堆场集合,  $Q_i \in F$ ;  
火车  $i$  开始在翻车机  $j$  上翻车的时间:

$$S_{ij} = a_i + w_i + d_i \quad (1)$$

火车  $i$  的等待时间:

$$w_i = \begin{cases} l_\alpha - a_i & (l_\alpha > a_i \text{ 且 } X_{ij} = 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\alpha = \max\{p \mid X_{pj} = 1; Y_{jk} = 1 \text{ 且 } p < i, p \in I\}$ 。

第  $i$  列火车被牵走的时间:

$$l_i = S_{ij} + \sum_{k \in Q_i} \sum_j X_{ij} Y_{jk} Z_{ik} U_{ij} \quad (3)$$

根据上述描述, 建立含有 0-1 变量的数学模型, 如下:

目标函数为卸车的总时间最少:

$$\min Z = \sum_i^n \sum_j^m \sum_k^o X_{ij} Y_{jk} Z_{ik} (l_i - a_i) + \sum_i^n \sum_j^m \sum_k^o X_{ij} Y_{jk} Z_{ik} \beta_i (S_{ij} - a_i - d_{ij}) \quad (4)$$

约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{j \in M} \sum_{i=1}^N X_{ij} = M \\ & 0 \leq \sum_{i=1}^N X_{ij} \leq 1 \\ & 0 \leq \sum_{j=1}^N Y_{jk} \leq 1 \\ \text{s. t. } & a_{i-1} \leq a_i \leq a_{i+1} \\ & X_{ij} = \begin{cases} 1, \text{空闲} \\ 0, \text{占用} \end{cases} \\ & Y_{ij} = \begin{cases} 1, \text{可达} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \\ & Z_{jk} = \begin{cases} 1, \text{相同} \\ 0, \text{不同} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $X_{ij}$  为火车  $i$  是否在翻车机  $j$  上作业;  $Y_{jk}$  为翻

车机  $j$  卸的煤炭是否可通过皮带机运输到对应的堆场  $k$ ;  $Z_{ik}$  为火车  $i$  的煤种是否与堆场  $k$  的煤种相同;  $S_{ij}$  为火车  $i$  在翻车机  $j$  上作业的开始时间;  $l$  为火车  $i$  被牵走时间;  $\beta_i$  为火车  $i$  等待时成本系数。

### 2.3 模型算法优化设计

火车-翻车机房-堆场联合调度优化模型的求解适合禁忌搜索算法<sup>[6]</sup>, 具体设计思路包括:

1) 初始化。根据煤炭卸车作业计划表, 给出有效的初始方案  $S [iIN]$ , 例如  $S [iIN] = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$  表示列车  $i$  被安排到房车机房 2 作业, 并计算出当前的目标函数值为  $Z_i$ 。设置控制参数, 初始温度  $T_0$ , 温度衰减系数  $\lambda$ , 终止温度  $T_e$ , 最大迭代次数  $C$ , 当前温度迭代次数  $c$ 。

2) 构造邻域可行解。随机选择有卸车交集的火车  $j$  和火车  $p$ , 在约束条件下进行可行解的交换, 根据目标函数计算当前的函数值  $Z_j$ , 令  $c++$ 。

3) 比较。如果  $Z_j > Z_i$ , 则转 4); 否则  $Z_i = Z_j$ , 转步骤 5)。

4) 运用 Metropolis 准则检验, 计算  $\Delta Z_{ij} = Z_i - Z_j$ , 若  $\exp(-\Delta Z_{ij}/T_i) \geq \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为 (0,1) 随机数。则  $Z_i = Z_j$ , 否则转 5)。

5) 温度下降规则。若  $u \geq U$  则  $T_{i+1} = \lambda T_i$ ,  $u = 0$ , 转 6), 否则转 2)。

6) 算法终止规则。若当前温度  $T_i \leq T_e$ , 算法终止, 否则返回 2)。

## 3 国投京唐港实证数据分析

### 3.1 仿真模型构建与结果分析

1) 模型初始状态假设。

假设如下: 依据先到先服务原则 (FCFS), 翻车机可以 1 次翻卸 3 节车厢 (“一翻三”); 考虑每列车的翻卸时间与堆场状态; 不考虑火车对位时间; 不考虑火车因等待时间过长, 或者到达火车数量太多而离开车站, 到别的车站卸车; 不考虑因大雾、雨雪、风浪等自然天气造成的封航停运; 不考虑煤炭从火车卸下后直接装船作业的直

装流程。

假设 1 d 内将有 15 列火车先后到港, 卸车时间见表 1。

表 1 每列火车卸车作业时间

火车	1	2	3	4	5
卸车时间/min	90	115	125	85	120

火车到达时刻表的确定, 为方便算法运算, 用阿拉伯数字代替原有火车车次, 列车到达时刻及可卸堆场根据实际情况给出, 以便于最大可能地描述翻车现场情况, 数据见表 2。

表 2 列车到达时刻

列车号	到达时刻	可卸堆场集合
1	09:10	1
2	09:40	1, 2
3	10:10	1
4	10:40	1, 2
5	11:20	2

翻车机初始工作状态见表 3, 假设共有 3 台翻车机可以翻车作业。在这里分别定义为 1#、2#、3#。翻车机的翻卸时间由列车的装载量所确定, 列车经翻车机翻车作业后经进场皮带机运送至堆场指定垛位, 堆料机准备堆料作业。

表 3 翻车机初始状态

翻车机	初始状态	待车时间/min
1#	无	0
2#	有	50
3#	无	0

卸车过程中的堆场状态见表 4。

表 4 堆场状态

堆场	初始状态	等待时间/min
1#	闲	0
2#	忙	50

在 Matlab 下, 可以方便地给出点阵, 其分析结果更具有一般性, 经过计算找到最小成本后, 将所得路径标注出来, 见表 5 和图 4。shortest\_path = 6 1 4 7 2 5 8 3, shortest\_length = 795 min。

表 5 最优卸车方案

到达车次	到达时刻	对应翻车机	卸车时间/min	待车时间/min
1	09:10	1 <sup>#</sup>	90	0
2	09:40	2 <sup>#</sup>	115	20
3	10:10	3 <sup>#</sup>	125	30
4	10:40	1 <sup>#</sup>	85	65
5	11:20	2 <sup>#</sup>	120	15

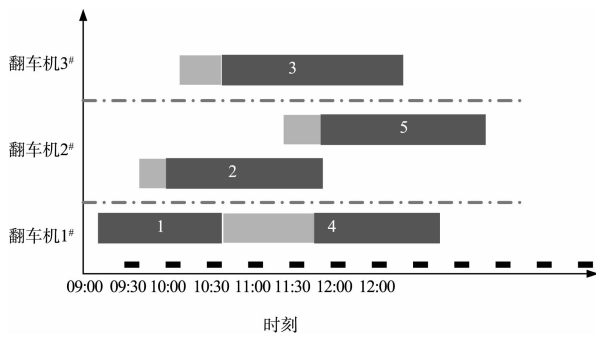


图 4 最优卸车方案

经过优化后的卸车时间为:  $T_u = \sum_i^5 U_i = 90 +$

$115 + \dots + 120 = 535 \text{ min}$ ; 等待时间为:  $T_w = \sum_i^5 w_i = 130 \text{ min}$ ; 卸车总时间为:  $T = T_u + T_i = 665 \text{ min}$ ; 卸车效率为:  $\eta = \frac{T_u}{T} = 80.45\%$ 。

2) 结果分析。

通过上述模型分析可得出卸车的等待时间为 130 min, 待车与翻车总时间为 795 min, 得出最优解, 给出最优调度方案。

火车整体在港口的卸车时间和等待时间的缩短, 对堆场煤炭吞吐量的提升、对港口的经济效益的提高起到很大的推动作用; 同时降低了煤炭平均在堆场垛位的堆存时间, 煤炭堆存时间的降低反映了煤炭周转效率的提升, 煤炭周转效率提升不仅对港口的经济效益增长起到推动作用, 而且还能降低因煤炭堆存时间过长引发的煤炭自燃给周围环境造成的空气污染, 同时还会提高客户对港口服务的满意度。

3.2 京唐港煤炭卸车现状

国投京唐港一期拥有翻车机 2 台、卸煤皮带机 2 条、堆场 5 个, 1~4 堆场各有 12 个垛位, 5 堆场有 10 个垛位。2~4 堆场每个垛位能堆存 7 万 t

(最高 8 万 t), 1 和 5 堆场每个垛位能堆存 2.4 万~3 万 t。

3.3 实例模型分析

根据国投京唐港现有卸车基础配备, 选取某天现场作业数据来验证模型及算法的有效性。数据及优化结果见表 6、表 7。

表 6 某天卸车白班计划

序号	到港车次	到港时刻	煤种	发货单位	卸煤时间/min
1	971397	8:30	平 1	平朔	0
2	871395	10:00	平 9	平朔	90
3	971301	10:30	蒙发混	乌海鑫诺	120
4	871303	12:00	伊泰 4	神华	210
5	871393	12:30	平 1	平朔	240
6	871305	13:30	平 1	满世	300
7	871311	15:00	新兴 1	神华	390
8	871313	16:00	华能混	蒙泰煤电	450
9	871307	18:30	汇能混	华通	600
10	871309	18:30	乌兰混	伊泰	600
11	871315	20:30	新兴 1	明华	720

表 7 优化结果 1

序号	到达车次	到达时刻	对应翻车机	对应堆场	待车时间/min
1	971397	8:30	1 <sup>#</sup>	II-1	0
2	871395	10:00	2 <sup>#</sup>	I-6	0
3	971301	10:30	1 <sup>#</sup>	III-2	0
4	871303	12:00	2 <sup>#</sup>	II-8	0
5	871393	12:30	1 <sup>#</sup>	II-7	0
6	871305	13:30	2 <sup>#</sup>	IV-3	5
7	871311	15:00	1 <sup>#</sup>	IV-2	0
8	871313	16:00	2 <sup>#</sup>	III-1	0
9	871307	18:30	1 <sup>#</sup>	III-10	0
10	871309	18:30	2 <sup>#</sup>	IV-9	0
11	871315	20:30	2 <sup>#</sup>	IV-2	0

以上结果是假定在每条皮带机可以送达任意堆场的情况下假定的。但实际生产中由于前期规划设计未考虑港口扩建, 有些堆场是翻车机不能送达的, 因此产生了卸车瓶颈环节, 在考虑实际情况下, 翻车机 2<sup>#</sup>上的煤不能运达堆场 4, 则火车 871305 (序号 6)、871309 (序号 10)、871315 (序号 11) 必须在翻车机 1<sup>#</sup>上作业, 由此导致以上 3 列火车必须等待翻车机 1<sup>#</sup>的前列火车作业完成, 才可以完成后续作业, 经计算, 得到的实际作业计划见表 8。

表8 优化结果2

序号	到达车次	到达时刻	对应翻车机	对应堆场	待车时间/min
1	971397	8:30	1 <sup>#</sup>	II-1	0
2	871395	10:00	2 <sup>#</sup>	I-6	0
3	971301	10:30	1 <sup>#</sup>	III-2	0
4	871303	12:00	2 <sup>#</sup>	II-8	0
5	871393	12:30	1 <sup>#</sup>	II-7	0
6*	871305	13:30	1 <sup>#</sup>	IV-3	45
7	871311	15:00	2 <sup>#</sup>	IV-2	0
8	871313	16:00	1 <sup>#</sup>	III-1	0
9	871307	18:30	1 <sup>#</sup>	III-10	0
10*	871309	18:30	1 <sup>#</sup>	IV-9	95
11*	871315	20:30	1 <sup>#</sup>	IV-2	0

由表7、8结果对比可知：火车待车时间由原来的5 min增长到140 min，增长率为2700%，目标函数由原来的820 min增长到955 min，增长率为16.46%，这是待车价值系数 $\beta = 1$ 时的结果，当系数 $\beta$ 增大时，相应的目标函数值增长的比例会更大，因此减少火车等待时间是优化的关键。

#### 4 结语

1) 以煤炭下水港口卸车方式为研究主题，综合考虑车流的集中到达、列车的限制性调度等因素，建立起以待车时间最短、且翻卸时间最短的火车-翻车机-堆场联合调度优化模型。

2) 以对实际系统进行合理的抽象和一定的假设为前提，运用禁忌搜索算法进行仿真模型优化，计算出最优的翻车调度计划。在算例中，火车整体在港口的卸车时间和等待时间大幅缩短，保证了堆场煤炭吞吐量提升与较高的煤炭周转效率。

3) 由于现在火车的卸车时间基本固定在95 min左右，在可见的未来变化情况不大，因此煤炭调度的核心是煤炭从翻车机到堆场的运输过程，要解决其瓶颈，京唐港现阶段必须改变设备运输能力，达到任意条皮带机可以把煤炭送达任意个堆场的垛位上的目标，这样卸车环节才能实现低成本高效率的调度目标。

4) 卸车联合调度过程中，以港口列车进港作业时间点及船舶到港时间点的历史数据为基础，可进一步堆场机械设备的最优调度次序，实现港口堆场设备的合理调度。

#### 参考文献：

- [1] 邵一. TJMT堆场系统生产组织优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [2] 张建, 郭岳峰. 大秦线港口站对位卸车模型及算法[J]. 铁路计算机应用, 2013(6): 35-37.
- [3] Yong Zeng, Dacheng Liu. Complex Vehicle Scheduling Optimization Problem Based on Improved Ant Colony Algorithm [C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering Lecture Notes in Electrical Engineering. 2013, 211: 805-812.
- [4] 刘文远, 李英帅. 基于Agent的同步休假排队调度系统仿真研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(8): 2784-2786.
- [5] 袁芳. 蚁群算法的改进及其在港口煤炭卸车调度中的应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010: 31-35.
- [6] 董宗然, 周慧. 禁忌搜索算法评述[J]. 软件工程师, 2010(S1): 96-98.

(本文编辑 武亚庆)

