

文章编号:1671-1637(2012)03-0086-06

集卡动态调度路径优化算法

李广儒¹, 杨大奔¹, 任大伟²

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中国海事局 船舶检验处, 北京 100023)

摘要:从整体调度的角度出发,分析了整个码头作业面的动态调度方案,提出了一种新的集装箱卡车(集卡)动态调度路径的自适应蚁群算法。运用码头 GPRS 系统,以集卡速度、流量、位置等相关数据建立了感知链。通过判断阻塞状况和调整可行点集,确定了信息素浓度更新策略与转移概率计算方法。针对码头路网的复杂性和蚁群算法的实时计算效率,设计了蚁群算法的步骤。将信息熵引入到蚁群算法中,运用 MATLAB 软件,对集卡的动态调度方案进行了仿真计算。计算结果表明:当初始集卡速度分别为 $50, 75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 初始集卡流量分别为 $800, 1\,000 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,集卡行驶的最短路径为 4.3 km , 行驶时间为 0.057 h ; 集卡行驶的最优路径为 8.3 km , 行驶时间为 0.111 h 。可见,该算法能有效缓解码头阻塞问题,提高集卡利用率和码头作业效率。

关键词:港口运输; 码头调度; 集卡分配; 最优路径; 蚁群算法; 信息熵

中图分类号: U691.3

文献标志码: A

Path optimization algorithm of dynamic scheduling for container truck

LI Guang-ru¹, YANG Da-ben¹, REN Da-wei²

(1. School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. Ship Survey Department, Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, Beijing 100023, China)

Abstract: From the point of integrated scheduling, the dynamic scheduling method of whole terminal operating field was analyzed, and a new adaptive ant colony optimization of dynamic scheduling for container truck was put out. The GPRS system of terminal was used, and the perception chain was set up by using related data such as the speed, flow and position of container truck. Through judging obstruction status and adjusting feasible point set, the calculation methods of updating strategy and transition probability for pheromone concentration were determined. Aiming at the complexity of terminal road network and the real-time calculation efficiency of ant colony optimization, the steps of ant colony optimization were designed. The information entropy was introduced into ant colony optimization, the MATLAB software was used, and the simulation calculation of dynamic scheduling method for container truck was carried out. Simulation result shows that when the initial speeds of container trucks are $50, 75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively and the initial flows of container trucks are $800, 1\,000 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively, the shortest driving path of container truck is 4.3 km , and the driving time is 0.057 h . The optimal driving path of container truck is 8.3 km , and the driving time is 0.111 h . By using the proposed algorithm, the obstruction problem of terminal can be remitted effectively, and the utilization ratio of container truck and the operating efficiency of terminal can increase obviously. 3 tabs, 2 figs, 16 refs.

收稿日期:2012-01-09

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG18B03);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QN013)

作者简介:李广儒(1970-),男,辽宁大连人,大连海事大学副教授,工学博士,从事海上智能交通信息处理研究。

Key words: port transportation; terminal scheduling; container truck allocation; optimal path; ant colony optimization; information entropy

Author resume: LI Guang-ru (1970-), male, associate professor, PhD, +86-411-84724329, liguangru@sina.com.

0 引言

目前,国内外大多数集装箱码头装卸作业的模式是采用多辆集装箱卡车(简称集卡)固定搭配组合为指定的桥吊提供装卸作业,这种方式调度操作简单,但存在集卡作业线路固定,利用率较低,集卡空载行驶距离占集卡总行驶距离 50% 以上等问题。基于码头动态监控系统的集卡动态调度模型能够根据采集到的桥吊下等待装卸船舶的集卡数量,自动分配集卡到能够满足作业能力、等待数量较小的桥吊进行装卸服务,从而可以均衡作业线路集卡数量,实现不同作业线路的有序、高效的装卸作业模式。这种作业模式的设计是根据整个码头作业面进行集卡统一调度,包括船舶装卸、场地移拼箱等作业流程环节,集卡不再局限于为某个固定的桥吊或作业线路服务,而是在完成当次作业后,接收调度系统按照路径优化和生成调度原则分派的下个作业任务,集卡服务的对象是在整个码头作业面范围内进行动态分配^[1-2]。这种按照路径优化的设计方式会改变集卡作业模式,例如集卡将指定堆场的集装箱运送到指定的桥吊完成作业后,不再直接返回箱区进行下个装船作业,而是进入分配的卸船作业区进行卸船作业,从而实现集卡重进重出与双向重载。这种系统动态调度方式与整个码头作业面协调匹配,极大提高了集卡的重载利用率^[3]。

近年来,国内外一些学者研究了各类集卡调度问题,张海霖等提出以集卡最小等待时间作为动态调度方式的判别依据^[4];于蒙等提出了基于 Agent 技术的集卡调度方式,将各个作业环节设为单个的智能体进行研究^[5];韩晓龙等提出了基于评价指标的装卸作业系统仿真方法^[6-7];Zeng 等提出了面向桥吊的任务分配方法^[8];Peteringa 等提出了泊位与堆场设备一体化方法^[9];Zhao 等提出了基于船舶到港信息的预作业计划处理方案^[10]。上述这些研究从不同方面与角度在一定程度上推动了码头作业效率的提升,由于技术限制等一些原因无法实时感知道路状况和集卡运行状态的信息,难以开展基于整个码头作业面的研究。随着通用无线分组业务(General Packet Radio Service, GPRS)实时监控技

术的应用,道路实时信息和集卡运行状态的获取问题得到了解决,这为研究集卡的路径优化调度提供了基础。

本文基于码头运行的实时信息数据,综合考虑集卡行驶路线的安全距离与集卡运行最小等待时间等因素的解决方案;基于集卡动态调度的路径优化提出一种面向整个码头作业面的自适应路径优化算法,在考虑提高装卸效率的同时,注意节省集卡运行成本,提高集卡运行效率,降低码头运营成本,为建立绿色码头的目标提供保障。

1 集卡最优路径的动态蚁群算法设计

集卡运行范围主要在相对封闭的码头上,通过车辆 GPRS 系统可获得集卡的当前位置信息和运行状态信息。针对码头动态调度的要求,结合阻塞模型,本文提出了一种自适应的动态蚁群算法,进行路径优化研究。这种动态蚁群算法是从整个码头作业面角度寻找最优路径,使得整个调度系统在作业时间和作业空间分布上尽可能得到协调,从而提高码头整体运行效率。

本文根据 GPRS 系统采集的码头实时路网信息,按照集卡阻塞定义的判断方式动态判断阻塞状况和计算可行点集,采用改进的蚁群算法进行判断和选择,通过信息熵进行调整,计算码头支路的信息素浓度,最后输出集卡的最优路径。在传统的蚁群算法处理集卡调度问题过程中,蚂蚁对码头实时路网信息没有感知^[11],也无法根据路网阻塞状况对搜索行为做出动态调整^[12]。本文针对码头集卡作业特点,利用 GPRS 系统接收的集卡数量、速度等数据,建立路网感知链,根据码头路网的状态实时调整可行点集;同时考虑到码头路网交错的复杂性与蚁群算法的实时运行效率,引入信息熵建立算法控制机制并将其作为判断度量来提高算法的运行速度。

1.1 集卡阻塞定义和控制机制

交通流模型是表达交通流速度、流量、密度等交通特性参数相互关系的数学方法。参考文献[13],本文根据 Greenshields 模型的阻塞定义,提出了以集卡速度、密度流量相结合的方式来判断支路集卡阻塞状况。依据集卡的行驶特性和码头作业要求,

则有^[14]

$$\begin{cases} v_{ij} = v_{ijf}(1 - \rho_{ij}/\rho_{ij0}) \\ q_{ij} = \rho_{ij}v_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{ij} 、 v_{ijf} 分别为节点 i 到节点 j 的支路上的集卡速度、集卡自由行驶速度; ρ_{ij} 、 ρ_{ij0} 分别为节点 i 到节点 j 的支路上的集卡密度、集卡阻塞密度; q_{ij} 为节点 i 到节点 j 的支路上的集卡流量, 即通过码头路网单位距离的集卡的数量。

设码头节点 i 到节点 j 的支路上的平均最小集卡间距为 h_{ijs} , 平均最小集卡时距为 h_{ijt} , 则节点 i 到节点 j 的支路上的集卡阻塞密度为

$$\rho_{ij0} = 1\,000/h_{ijs}$$

支路集卡最大通行能力为

$$q_{ijm} = 3\,600/h_{ijt}$$

支路集卡最大通行密度为

$$\rho_{ijm} = \rho_{ij0}/2$$

支路集卡阻塞临界速度为

$$v_{ijm} = q_{ijm}/\rho_{ijm} = 36h_{ijs}/5h_{ijt}$$

码头节点 i 到节点 j 的支路是否阻塞的判断流程分为以下 3 步。

步骤 1: 如果集卡流量超过最大码头支路集卡通行能力, 则转步骤 3, 其他转步骤 2。

步骤 2: 如果集卡速度小于支路集卡阻塞临界速度, 则转步骤 3。

步骤 3: 码头节点 i 到节点 j 的支路阻塞。

根据码头支路阻塞的判断结果, 可以定义蚁群算法的阻塞函数。通过 GPRS 系统采集码头现场数据, 将 h_{ijt} 、 h_{ijs} 、 q_{ij} 、 v_{ij} 作为阻塞函数的输入参数, 将码头支路的阻塞节点记录在阻塞表中。当节点 i 到节点 j 的支路阻塞时, 集卡以较大概率选择其他支路, 当节点 i 到节点 j 的支路阻塞减弱时, 该节点重新释放为可行节点, 需要在阻塞表中删除此节点。同时, 通过 GPRS 系统感知集卡实时数据, 根据码头各支路阻塞程度的变化状况, 动态调整可行节点集, 并更新信息素浓度, 提高集卡路径判断速度。

1.2 可行点集 A_k 的动态确定

1.2.1 可行点集的表示方式

传统蚁群算法在处理 TSP 过程中^[9], 蚂蚁 k 在节点 l 的可行点集记为 A_{kl} , 为节点总数 n 与蚂蚁 k 经过节点 P_k 两者之差的集合。

本文依据码头路网特点和集卡运行方式, 将算法的可行节点集定义为在当前节点 l 的蚂蚁 k 满足约束条件下可能进行选择的节点集合, 其中约束条件为当前节点与下个节点之间的支路可通行无阻

塞, 且后续节点不重复经过同一个节点。

本文根据码头的平面位置图, 将码头相关节点抽象成位置坐标, 根据位置坐标计算蚂蚁运行方向, 通过修改关系矩阵与生成动态控制策略, 控制蚂蚁的位置变化。

1.2.2 可行点集 A_{kl} 的建立策略

蚂蚁 k 的可行点集 A_{kl} 的确定流程如下。

(1) 判断 P_k 或阻塞表中是否存在该节点, 若存在, 则从 A_{kl} 删除该节点。

(2) 判断 A_{kl} 是否为空集, 通过阻塞缓解、码头路网修复等将待节点释放到 A_{kl} 。

(3) 确定满足约束条件的剩余节点集合为 A_{kl} 。

1.3 信息素浓度更新策略

本文采取自适应的信息素浓度实时更新策略^[15], 集卡完成一次任务循环便立即更新其经过路径的信息素浓度, 动态调整相关参数。

在节点 i 到节点 j 的支路上, 如果在 Δt 时间内, 集卡完成一次任务循环, 则有

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \gamma\tau_1 + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ijk} \\ \Delta\tau_{ijk} &= \begin{cases} Q/L_k & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过节点 } i \text{ 与节点 } j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Q 为信息素强度; L_k 为蚂蚁 k 在本次循环中路径的总长度; γ 为信息素残留因子, 为了防止信息素无限累积, 需设 $\gamma < 1$, 但也要防止 γ 过小, 影响算法的收敛速度; τ_2 为 $t + \Delta t$ 时刻的信息素浓度; τ_1 为 t 时刻的信息素浓度; m 为蚂蚁数量; $\Delta\tau_{ijk}$ 为 t 与 $t + \Delta t$ 时刻的信息素浓度变化值。

当集卡路径搜索求得的最优值没有明显改进时, γ 减为

$$\gamma = \begin{cases} 0.95\gamma_1 & 0.95\gamma_1 \geq \gamma_{\min} \\ \gamma_{\min} & \text{其他} \end{cases}$$

式中: γ_1 为为当前时刻的上一时刻的信息素残留因子; γ_{\min} 为最小信息素残留因子。

1.4 转移概率选择

蚂蚁 k 从码头节点 i 选择节点 j 的转移概率 p_{ijk} 为

$$p_{ijk} = \begin{cases} \frac{\tau_1^\alpha \eta_1^\beta}{\sum_{s=1}^n \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta} & j, s \in A_{kl} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: η_1 为码头节点 i 到节点 j 的能见度因子, 即为节点 i 到节点 j 的距离 d_{ij} 的倒数; α 为信息启发因子; β 为能见度启发因子; τ_{is} 为节点 i 到节点 s 的信息素浓

度; η_{is} 为节点*i*到节点*s*($s \neq i$)的能见度因子。

2 集卡最优路径的动态蚁群算法框架

本文基于 GPRS 系统实时采集数据建立的可行点集,可对码头状况进行动态感知,为保证集卡路径优化算法的性能,将信息熵引入到蚁群算法中^[16],通过信息熵衡量算法的进化程度,并以其作为度量算法终止的准则,实现算法的自适应控制,提高算法的收敛速度。

对于离散型随机变量,信息熵 H 为

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

$$p_i \geq 0$$

式中: K 为待定系数; p_i 为集卡路径选择经过节点*i*的概率。

最大信息熵为

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (5)$$

由于蚁群算法中的各个路径信息素浓度具有不确定性,因而集卡路径选择也具有不确定性,信息熵在不确定性度量方面具有很好的处理能力,可通过信息熵来控制码头支路最优路径的保持概率和更新策略。

依据 GPRS 系统采集的相关数据,则有

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1/c_1 K \\ \beta_1 = 1 - c_2 K \end{cases} \quad (6)$$

式中: c_1 、 c_2 均为待定常数且大于0; β_1 为集卡最优路径保持概率; α_1 为允许信息素浓度更新的码头支路比例。

根据信息熵变化调整算法的运行机制,在算法初始阶段,各个支路的信息素浓度基本相同,信息熵数值相对较小,可以均匀搜索解空间。随着进化过程的更新,熵值增大,局部寻优搜索能力得到加强。对于 β_1 而言,算法初始阶段数值相对较大,可以最大可能搜索最优路径,随着进化过程的更新,数值适当减小,加大局部随机变异扰动,避免算法过早收敛,具体流程如下。

步骤1:在算法初始化后,判断算法是否满足终止条件,若满足终止条件,输出最优路径;若不满足终止条件,改变路径信息继续搜索。

步骤2:计算 H 和 α_1 ,确定最优路径解集。

步骤3:在解集内部按 β_1 的概率变异,重新计算

H ,返回步骤1进行终止条件判断。

采用信息熵动态调整蚁群算法转移概率的参数 α_1 与 β_1 ,可进一步控制信息素浓度的支路比例与局部随机操作影响,将信息熵作为算法终止条件的度量,使算法具有自适应的调节机制,平衡算法的收敛速度。

3 集卡最优路径的动态蚁群算法步骤

集卡最优路径的动态蚁群算法步骤如下。

步骤1:设置起始点、目的点;初始化控制参数 α 、 β 和 Q (自定义), H 初始设置为 H_{\max} ;由 GPRS 系统获取码头节点*i*到节点*j*的支路上的集卡速度 v_{ij} 、集卡流量 q_{ij} 、平均最小集卡间距 h_{ijs} 、平均最小集卡时距 h_{ijt} ; m 只蚂蚁随机均匀置于 n 个节点上。

步骤2:循环处理过程,若 $H \leq 10^{-5}$,则转步骤3;将蚂蚁*k*的起始节点放入 P_k 进行搜索,直至搜索到目的点,循环结束,转步骤2.1;若不是目的点,根据阻塞函数和感知链确定 A_{kl} ,计算转移概率 p_{ijk} ,调整节点继续搜索。

步骤2.1:判断蚂蚁*k*是否到达目的点,根据式(2)更新蚂蚁所经过码头各支路的信息素浓度,记录长度 L_k ;计算 H ,调整参数 α_1 与 β_1 ;清空 P_k ,并将蚂蚁重新置于起始点,继续搜索。

步骤2.2:当最后一只蚂蚁到达终点后,完成一次循环迭代。

步骤3:比较所有路径,确定最优路径输出结果,本次算法运行结束。

4 计算结果分析

本文以大连港大窑湾集装箱码头(二期)为例,依据码头建设的生产调度系统采集的集卡相关信息参数见表1,将码头位置抽象后形成的各节点坐标见表2。

通过 GPRS 系统确定集卡本次任务的起始点与目的点,假设起始点为节点2,目的点是节点9。通过接收集卡位置、速度数据,根据调整过的 Greenshields 模型进行码头各支路的阻塞情况判断,设2个支路(节点1到节点4的支路与节点2到节点5的支路)集卡速度 v_{14} (v_{25})均为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,其余支路集卡速度均为 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;设节点6到节点9的支路集卡流量 q_{69} 为 $1\,000 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$,其余支路集卡流量均为 $800 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

设各支路平均最小集卡间距离 h_{ijt} 为40 m,平均最小集卡时距 h_{ijs} 为4 s,支路最大通行能力 q_{ijm} 为

表 1 信息参数

Tab. 1 Information parameters

数据类别	参数
集卡动态数据	任务编号、驾驶人姓名、驾驶证号码与驾驶证获得的时间、车辆状况、车速、车辆位置(经纬度)、载质量、载货箱号、车头方向、剩余油量
驾驶人数据	驾驶人姓名、身份证号码、驾驶证号码、性别、驾龄、联系方式
排班管理数据	班制类别、班制开始与结束时间
气象数据	日期、时间、天气状况、能见度、风力、风向、温度、湿滑度
集卡调度管理数据	作业车辆号码、驾驶人姓名、作业地点、作业开始时间与结束时间、作业类型
任务管理数据	任务编号、作业车辆号码、作业起点与目的点、作业设备号、预计到达时间、箱号
路径输出数据	任务编号、作业车辆号码、作业地点、作业起点与目的点、GIS转向点
拖车日常管理数据	作业车辆号码、配件更换日期与里程数、轮胎更换日期与里程数、平均油耗
集装箱在场数据	码头代码、集装箱 ID 号码、船名、进口/出口航次、箱号、箱型、尺寸、空箱质量、内外贸类型、危险品等级、冷藏标记、超限标识、船舶公司、箱持有人、舱主、箱位、航线
设备静态数据	设备编号、设备名称、作业公司、设备类型、最大载质量、RFID 识别号
设备动态数据	设备编号、设备状态、操作员号码、任务编号、作业数量、作业开始时间与结束时间、载质量

表 2 节点像素坐标

Tab. 2 Pixel coordinates of nodes

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
横坐标/100 Pixel	15	35	55	15	35	55	15	35	55
纵坐标/100 Pixel	37	37	37	24	24	24	14	14	14

900 veh · h⁻¹, 此时最大阻塞临界速度 v_{ijm} 为 72 km · h⁻¹。

此时, $q_{14} = q_{25} = 800 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, 小于码头支路最大通行能力 900 veh · h⁻¹, $v_{14} = v_{25} = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 小于阻塞临界速度 72 km · h⁻¹, 这是因为当前支路正在施工或者发生意外情况, 导致码头该支路通行能力受限, 形成了阻塞; $q_{69} = 1\,000 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, 大于码头阻塞临界密度 900 veh · h⁻¹, 且 $v_{69} = 75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 小于最大阻塞临界速度 80 km · h⁻¹; 综合判断, 经过节点 1 到节点 4 的支路、节点 2 到节点 5 的支路、节点 6 到节点 9 的支路均处于阻塞状态。

当信息素残留因子 γ 为 0.95 时, 根据 MATLAB 软件运行得出最优路径信息见表 3, 路径中数字为节点编号。

由表 3 可见, 最优路径节点顺序为 2→3→6→5→8→9, 行驶时间为 0.111 h, 行驶距离为 8.3 km; 空间距离最短路径节点顺序为 2→3→6→9 或 2→5→6→9 或 2→5→8→9, 由于 2→5 或 6→9 处于阻塞

表 3 路径计算结果

Tab. 3 Calculation result of paths

路径	行驶距离/km	行驶时间/h	备注
2→3→6→5→8→9	8.3	0.111	无阻塞, 最优路径
2→3→6→9	4.3	0.057	6→9 阻塞, 最短路径 1
2→5→6→9	4.3	0.066	6→9 阻塞, 最短路径 2
2→5→8→9	4.3	0.066	2→5 阻塞, 最短路径 3
2→1→4→5→8→9	8.9	0.123	1→4 阻塞

状态, 这时码头支路通行能力将会显著下降, 如果继续选择空间最短路径, 会加剧码头支路拥塞, 从集卡调度效率角度衡量, 并非最优路径。

集卡最优路径与最短路径分别见图 1、2。在图 1 中, 虚线表示有阻塞的码头支路, 从中可知, 当码头支路发生阻塞时, 自适应蚁群算法能够针对码头实际状况有效的搜索到最优路径引导集卡行驶, 避免或减缓码头阻塞, 提高集卡的运行效率和码头路网利用率, 提升码头的作业能力。

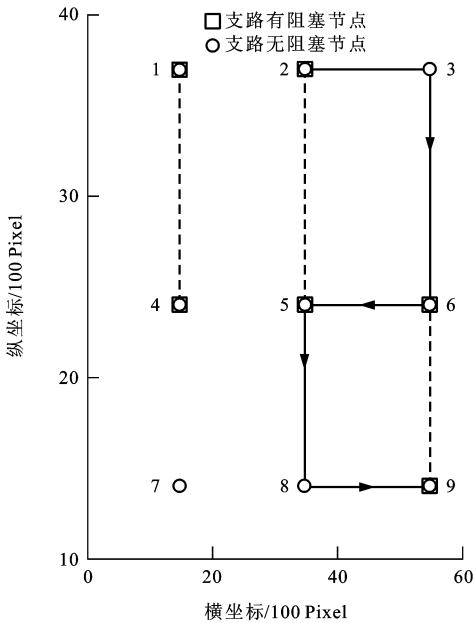


图 1 最优路径
Fig. 1 Optimal path

5 结 语

本文针对码头集卡作业方式问题, 以码头集卡为研究对象, 寻求实时、动态解决这一实际问题的途径, 提出了基于整个码头作业面的集卡动态调度路径优化算法, 通过 GPRS 码头系统获取道路实时信息。融合阻塞理论、蚁群算法、计算机仿真技术, 从码头系统调度角度研究优化方案, 为开展以码头作业面为中心的工作调度模式与解决重进重出难题提

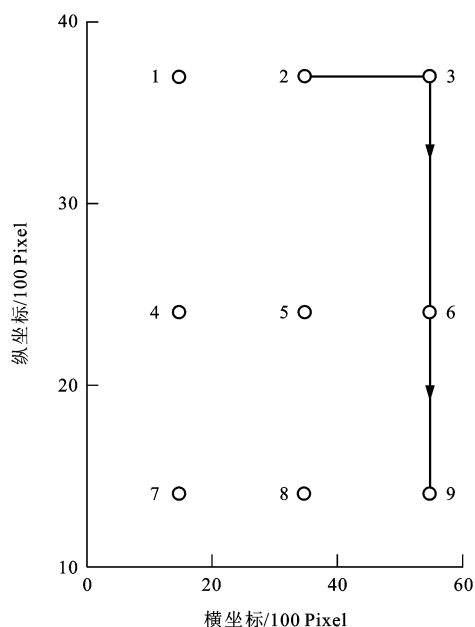


图2 最短路径

Fig. 2 Shortest path

供了基础,对提高集卡运行效率提供保障。

蚁群算法的相关参数值确定对路径优化算法的效率有较大影响,目前只能通过码头 GPRS 系统和统计的经验数据确定参数,从理论角度探索路径优化算法的相关参数值有待于进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] VIS I F A, DE KOSTER R. Transshipment of containers at a container terminal: an overview[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 147(1): 1-16.
- [2] MURTYA K G, LIU Ji-yin, WAN Y W, et al. A decision support system for operations in a container terminal[J]. *Decision Support Systems*, 2005, 39(3): 309-332.
- [3] 寿涌毅,赖昌涛,吕如福. 班轮船舶调度多目标优化模型与蚁群算法[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(4): 84-88.
SHOU Yong-yi, LAI Chang-tao, LU Ru-fu, et al. Multi-objective optimization model and ant colony optimization of liner ship scheduling[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(4): 84-88. (in Chinese)
- [4] 张海霖,江志彬,许 泓. 集装箱港口集疏运调度系统作业模式的仿真分析[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(6): 1024-1030.
ZHANG Hai-lin, JIANG Zhi-bin, XU Hong. A simulation study of container terminal scheduling system[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(6): 1024-1030. (in Chinese)
- [5] 于 蒙,王少梅. 基于多 Agent 的集装箱码头生产调度系统建模研究[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2007,

31(3): 494-498.

- YU Meng, WANG Shao-mei. Research on modeling of multi-agent-based scheduling system for container terminal[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering*, 2007, 31(3): 494-498. (in Chinese)
- [6] 韩晓龙,丁以中. 集装箱港口装卸作业仿真系统[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(8): 2366-2369.
HAN Xiao-long, DING Yi-zhong. Simulation system of container terminal charge/discharge operations[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8): 2366-2369. (in Chinese)
- [7] 周 强,王孟昌,杨国平,等. 集装箱码头道路交通仿真模型研究[J]. *水运工程*, 2007(2): 48-52.
ZHOU Qiang, WANG Meng-chang, YANG Guo-ping, et al. On traffic simulation model of container terminals[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2007(2): 48-52. (in Chinese)
- [8] ZENG Qing-cheng, YANG Zhong-zhen, LAI Lu-yuan. Models and algorithms for multi-crane oriented scheduling method in container terminals[J]. *Transport Policy*, 2009, 16(5): 271-278.
- [9] PETERINGA M E H, MURTYB K G. Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(5): 1711-1725.
- [10] ZHAO Wen-juan, GOODCHILD A V. The impact of truck arrival information on container terminal rehandling [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(3): 327-343.
- [11] NETO R F T, FILHO M G. A software model to prototype ant colony optimization algorithms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(1): 249-259.
- [12] 杨大奔. 基于 GAAA 算法的码头集卡优化调度研究[D]. 大连:大连海事大学, 2010.
YANG Da-ben. GAAA algorithm-based optimized dispatch for container trucks in container terminals [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)
- [13] 潘 登,郑应平,陆小芳. 避免车辆路径阻塞的动态蚁群算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(5): 1-4.
PAN Deng, ZHENG Ying-ping, LU Xiao-fang. Dynamic ant colony algorithm for avoiding congestion on vehicle routes[J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(5): 1-4. (in Chinese)
- [14] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [15] GAMBARDELLA L M, TAILLARD E, DORIGO M. Ant colonies for the quadratic assignment problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50(2): 167-176.
- [16] REIMANN M, DOERNER K, HARTL R F. Ants: savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2004, 31(4): 563-591.