

# 基于人工蜂群算法的交叉口指路标志设置优化方法<sup>\*</sup>

张腾, 黄敏, 刘芳, 郑健

(中山大学智能工程学院//广东智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 当路网中存在多条不可达指引路径时, 路径间存在着相互影响, 单独优化无法达到整体最优。针对这一现象, 本文提出了一种新的综合优化模型。首先对指引路径的可达性及综合优化问题进行了分析, 并基于此给出了以指引路径长度和增设指引信息数量综合最优为目标的优化模型; 然后结合人工蜂群算法和适用于路网的邻域搜索策略, 设计了该问题的具体求解算法; 最后以广州大学城为试验区域, 利用上述模型实现了以中山大学为目标的多条指引路径的综合优化指引, 并与单独优化结果进行了对比分析。实验结果表明: 该模型从整体上考虑了路径优劣, 能有效地解决多条指引路径的综合优化问题。

**关键词:** 交通工程; 指路标志诱导系统; 人工蜂群算法; 指引路径; 线性规划模型

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2019)03-0131-09

## Optimization method of intersection guide sign setting based on artificial bee colony algorithm

ZHANG Teng, HUANG Min, LIU Fang, ZHENG Jian

(School of Intelligent Systems Engineering, SunYat-sen University//Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** When there are many unreachable paths in the road network, there exists mutual influence between the paths, and the optimization cannot reach the overall optimum. Aiming at this phenomenon, a new integrated optimization model is presented. Firstly, the accessibility and comprehensive optimization of guide path are analyzed. Based on this, a comprehensive path optimization guidelines model is proposed with the optimization of the path length and the number of guidance information. Then combining with artificial bee colony algorithm and a neighborhood search strategy for road networks, the algorithm is designed to solve the problem of the concrete design. Finally, Guangzhou Higher Education Mega Center is chosen as the test area. The integrated optimization guidelines of the multiple guidance paths with the aim of Sun Yat-sen University are realized using the proposed model. In addition, comparing with single optimization results, experimental results show that the model can effectively solve the optimization problem for multiple path guidance, and the path quality is consider as a whole.

**Key words:** traffic engineering; guide sign system; artificial bee colony algorithm; guiding path; linear programming model

指路标志是一种交通诱导管理设施, 为交通参与者传递道路的相关信息(方向、地点、距离等

信息), 指引驾驶员做出合理的路径决策。合理的指路标志系统可以提高交通系统的运行效率, 缓解

\* 收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(U1611461, 11574407); 广东省科技计划项目(2016A020223006, 2017B010111007)

作者简介: 张腾(1994年生), 男; 研究方向: 交通规划与管理; E-mail: 121870913@qq.com

通信作者: 黄敏(1975年生), 女; 研究方向: 交通规划与管理; E-mail: huangm7@mail.sysu.edu.cn

交通拥挤。而实际情况中,指路标志存在信息的缺失、错误以及指引路径不连续等问题,导致出行者错行绕行现象频发<sup>[1]</sup>。为出行者提供连续的指引信息,帮助其顺利到达目的地是指路标志诱导系统最基本的功能。目前许多学者针对指引信息可达性进行了研究。韩跃杰等<sup>[2]</sup>建立了指路标志信息连续性评价模型,对路网中的指引信息可达性进行评价。黄敏等<sup>[3]</sup>结合出行者的寻路习惯,构建了指引信息可达性分析模型,并对指路标志可达性给予了明确的定义与评价。

基于对指路标志系统的可达性评价,优化指引信息是完善指路标志诱导功能、改善道路出行环境的重要举措。有学者提出了相应的指引信息优化方案<sup>[4]</sup>,把不可达路径扩展为指引可达路径。但,优化方案仅考虑了单条不可达路径的扩展优化,未从整体进行考虑,因此不能满足实际工程的需要。另一方面,车辆路径规划问题是一个 NP 问题,只有在路网规模较小时才有可能寻求其精确解。因此,启发式算法的应用成为人们研究求解该类问题的重要手段,如:蚁群算法、遗传算法、粒子群算法等<sup>[5-8]</sup>。但这些算法本身存在一系列问题,如:蚁群算法收敛速度慢、遗传算法易早熟收敛、粒子群算法精度不高且易陷入局部最优等。

人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 是由 Karaboga. D 于 2005 年提出的一种元启发式群智能算法。该算法具有设置参数少、搜索速度快,实现方便等优点,因此其已经被广泛地应用到各个优化领域<sup>[9-12]</sup>,如:求解旅行商问题、机器人路径规划、通讯领域等,并表现出了强大的适应性和优异性。此前已有学者<sup>[4]</sup>将人工蜂群算法应用到指引信息的优化问题中,并将实验结果与遗传算法进行了对比。实验表明:人工蜂群算法能比遗传算法更高效地寻找最优路径。本文针对已有的指路标志布设方案,利用可达性分析模型<sup>[3]</sup>得出了特定兴趣点的多条不可达路径;为将上述多条不可达路径扩展为可达路径,考虑了多条不可达路径扩展时的相互影响,进一步构建出以指引路径与指路标志布设综合最优为目标的优化模型;并利用该模型实现已有指路标志布设方案的优化。实验数据表明:本模型在指路标志优化布设方面具备更好的可行性。

## 1 指引路径优化问题描述

### 1.1 路网结构表示

出行者对于路径的选择是基于路网进行的,因

此交通路网是路径规划的基础。本文通过“节点-弧段”的方法对路网进行描述,将路网定义为  $G = \{V, A\}$ , 其中  $V = \{v_i\}$  为路网  $G$  中的节点集合,  $A = \{a_{ij} | a_{ij} = (v_i, v_j), v_i, v_j \in V\}$  为  $G$  中的弧段集合,  $a_{ij}$  为有向路段  $v_i$  到  $v_j$ ,  $c_{ij}$  为弧段  $a_{ij}$  的弧段信息,如路段长度信息。

### 1.2 指引路径与指引可达

指引路径是驾驶员根据指路标志系统的指引和驾驶员自身驾驶经验的指导,选择出的一条从起点前往指定终点的期望路径。在驾驶过程中,驾驶员会根据指路标志给出的指引信息进行路径选择。当道路交叉口缺少对目的地指引的指路标志时,驾驶员会根据自己的驾驶经验做出选择。

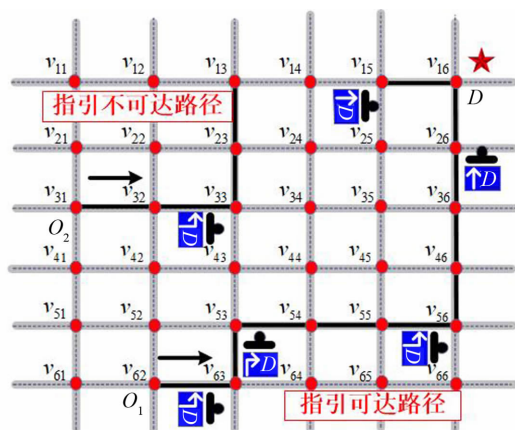


图 1 指引路径示意图

Fig. 1 Guide path

基于已有的指引信息可达性分析模型,本文对指引信息构成的指引路径进行分类和定义。已知某路网,路网结构如图 1 所示。当指引路径能够实现驾驶员从起点到终点的出行,就称这条指引路径是指引可达的,即  $O_1$  出发路径;反之,则称这条指引路径是指引不可达的,即  $O_2$  出发路径。

### 1.3 指引路径的综合优化问题

决策者在规划指引路径的过程中,需要综合考虑多方面因素,如:指引路径的长度、增设指引信息的数量、道路的重要程度等。

已有的单条路径优化模型<sup>[4]</sup>以指引路径长度和增设指路标志数量综合最优为目标,把单条不可达路径扩展为指引可达路径。然而,工程实际中可能出现多条不可达路径,如果将它们单独优化,并把结果进行直接叠加,所得的最终路径可能非最优。

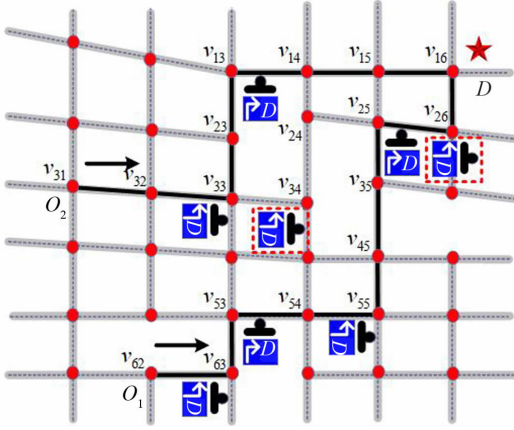


图 2 指引路径单独优化示意图

Fig. 2 Single optimization guide path

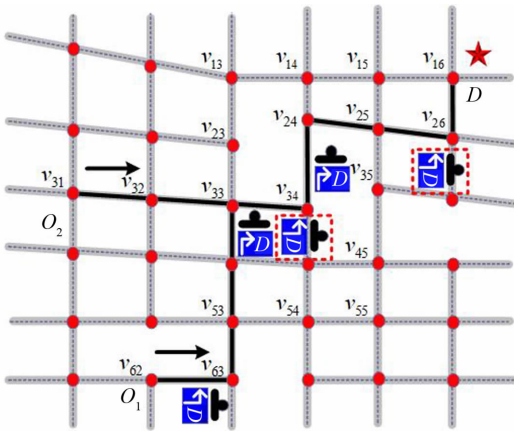


图 3 指引路径综合优化示意图

Fig. 3 Guide path overall optimization

如图 2 路网中, 已知  $O_1$ 、 $O_2$  为  $D$  的两条不可达路径端点, 且路网中已有指向  $D$  的指引信息 (图中虚线框内为已有指引信息, 下同), 对其分别进行优化, 得到的优化路径如图 2 所示。但若对两条不可达路径进行综合优化, 可得如图 3 所示路径。综合优化考虑到了对重复指引信息的利用, 两条路径在  $v_{33}$  处合流后, 路径可共用同一指引信息, 如:  $v_{34}$ 、 $v_{26}$  处共用已有指引信息,  $v_{24}$  处共用新设指引信息, 需增设指引信息要少于单独优化路径, 因此综合考虑此路径可能优于单独优化路径。

为了使系统的整体可达性达到最优, 需将多个单条扩展路径看成一个整体进行综合优化。

### 1.4 指引路径的综合优化模型

假定路网结构  $G$  已知, 对给定的被标识对象  $D$ , 其指引信息集合  $RS = \{rs\}$ , 设  $D$  共有  $n$  条不可达路径  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。则对于每条不可达路径  $x_i$ , 从其端点  $O_i$  开始扩展, 直至到达  $D$ , 该延伸指引路

径分段记为  $e_i$ , 记  $e = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  为  $D$  的一条延伸指引路径。如图 2 所示,  $e = \{e_1, e_2\}$  即为  $D$  的一条延伸指引路径。其中,  $e_1$  为起点  $O_1$  到终点  $D$  的路径,  $e_2$  为起点  $O_2$  到终点  $D$  的路径。 $E = \{e\}$  为  $D$  的所有可能延伸指引路径的集合。指路标志的综合优化模型需综合考虑指引路径长度和增设指路标志数量两个要素。但二者的数量单位不统一, 因此需要进行归一化处理。在已知指引路径的长度、已设置指路标志数量的前提下, 本文利用最大距离  $d$  和最大数量  $N$ , 实现了对指引路径长度和指路标志设置数量的归一化处理。

设从给定起点  $O_i$  到终点的最大距离为  $d_i$ 。结合相关研究<sup>[13]</sup>, 选用从起点到终点直线距离的 2 倍对最大距离  $d_i$  进行估算。针对一整条延伸指引路径  $e$ , 其最大长度为  $d = \sum_i d_i$ 。据前人研究<sup>[14]</sup>, 在一般城市路网中交叉口的合理间距为 300 多米, 若每个交叉口都设指路标志, 则延伸指引路径  $e$  设置标志的最大数量  $N$  可用公式  $N = d/300$  估算。

综上所述, 指引路径的综合优化模型如公式 (1) 所示。目标函数通过对指引路径长度和增设指路标志数量的归一化处理, 使得模型可通过目标函数值实现对整体优化方案的优劣评价, 且目标函数  $f$  值越小, 指引路径越优。

$$\min_{e \in E} f = \alpha_1 \sum_{i=1}^n \frac{\text{len}_i}{d_i} + \alpha_2 \frac{\sum_{i=1}^n \text{num}_i}{N}$$

$$s. t. RS(e_i) \cap RS(e_j) = \emptyset, \forall e_i, e_j \in e$$

$$RS(e_i) \cap RS = \emptyset, \forall e_i \in e \quad (1)$$

其中,  $\text{len}_i$  为延伸指引路径分段  $e_i$  的长度,  $\text{num}_i$  为  $e_i$  中需增设的指引信息个数,  $RS(e_i)$  为  $e_i$  中需增设的指引信息集合,  $\alpha_1$  表示路径长度对决策的重要程度占比,  $\alpha_2$  表示增设指引信息对决策的重要程度占比。

## 2 指引路径优化问题的人工蜂群算法

求解指引路径优化问题的关键在于综合考虑延伸指引路径的路径长度及增设指引信息数量, 使得延伸指引路径的总评价指数最优。结合人工蜂群算法的基本特点, 本文设计了一种人工蜂群算法用于求解该优化问题。

### 2.1 延伸指引路径表达方式

本文将单条延伸指引路径  $e$  定义为单个蜜源, 并记录为  $e = \{e_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ , 其中  $n$  为延伸指引路径中分段数。假设延伸指引路径分段  $e_i$  从

$O_i$  点出发, 依次经过  $v_{p(i)}$ 、 $\dots$ 、 $v_{q(i)}$  等点, 到达  $D$  点, 则记录  $e$  为

$$\begin{cases} e_1: O_1 \rightarrow v_{p(1)}(t_{p(1)}) \rightarrow \dots \rightarrow v_{q(1)}(t_{q(1)}) \rightarrow D \\ e_2: O_2 \rightarrow v_{p(2)}(t_{p(2)}) \rightarrow \dots \rightarrow v_{q(2)}(t_{q(2)}) \rightarrow D \\ \vdots \\ e_n: O_n \rightarrow v_{p(n)}(t_{p(n)}) \rightarrow \dots \rightarrow v_{q(n)}(t_{q(n)}) \rightarrow D \end{cases}$$

其中,  $t_j$  表示该路径经过节点  $v_j$  处是否需要增设指引信息。若需要, 则  $t_j = 1$ ; 反之, 则  $t_j = 0$ 。

根据前人的研究<sup>[15]</sup>, 在缺少指引信息的路口, 绝大多数驾驶员会选择直行。为简化算法表达, 本文仅在延伸指引路径转弯处增设指引信息。

如图 4 所示路网, 存在两条不可达路径, 端点分别为  $O_1$ 、 $O_2$ , 目的地为  $D$ , 且在  $v_{26}$  处已有指向  $D$  的左转指引信息。则图 4 中黑线为一条延伸指引路径  $e = \{e_1, e_2\}$ , 并在转弯处增设指引信息, 该路径  $e$  的编码为

$$\begin{cases} e_1: v_{62} \rightarrow v_{63}(1) \rightarrow v_{53}(1) \rightarrow v_{54}(0) \rightarrow v_{55}(1) \\ \rightarrow v_{45}(0) \rightarrow v_{35}(0) \rightarrow v_{25}(1) \rightarrow v_{26}(0) \rightarrow v_{16} \\ e_2: v_{31} \rightarrow v_{32}(1) \rightarrow v_{22}(0) \rightarrow v_{12}(1) \rightarrow v_{13}(0) \\ \rightarrow v_{14}(1) \rightarrow v_{24}(0) \rightarrow v_{34}(1) \rightarrow v_{35}(1) \\ \rightarrow v_{25}(0) \rightarrow v_{26}(0) \rightarrow v_{16} \end{cases}$$

其中,  $e_2$  经过点  $v_{25}$  时, 此处已有  $e_1$  增设指引信息, 不需重复增设, 因此  $e_2$  中  $t_{25} = 0$ 。

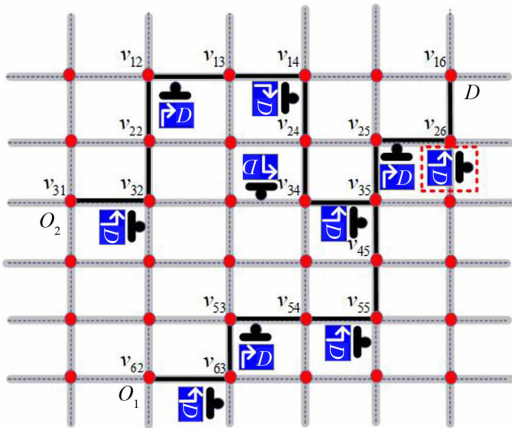


图 4 延伸指引路径示意图

Fig. 4 The extended guidance path

### 2.2 适应度函数

根据 1.4 中对目标函数的分析, 延伸指引路径  $e$  的优劣程度由适应度  $F$  判断。路径适应度  $F$  由式 (2) 求得, 适应度函数值越小, 指引路径越优。

$$F = \alpha_1 \sum_{i=1}^n \frac{\text{len}_i}{d_i} + \alpha_2 \frac{\sum_{i=1}^n \text{num}_i}{N} \quad (2)$$

### 2.3 算法整体流程

人工蜂群算法的整体流程如图 5 所示。

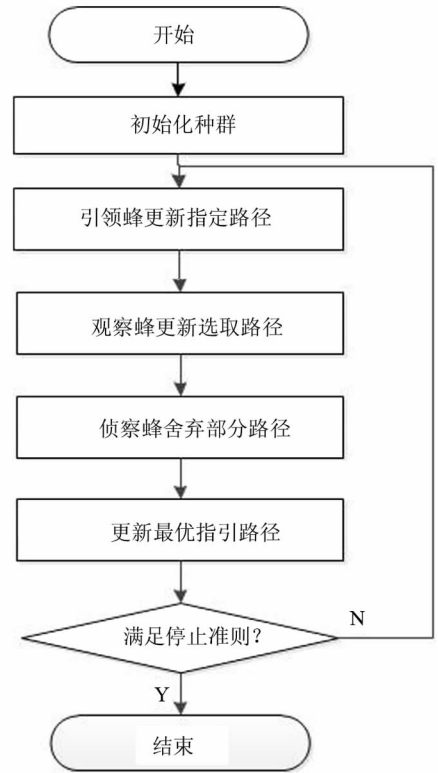


图 5 算法流程图

Fig. 5 Procedure of algorithm

其对延伸指引路径的更新分为引领蜂、观察蜂及侦察蜂三个阶段进行, 计算步骤如下:

(1) 初始迭代次数  $\text{cycle} = 1$ , 并初始化蜜源种群  $R = \{e^k | e^k \in E, k = 1, 2, \dots, \text{SN}\}$ , 其中  $\text{SN}$  为蜜源种群规模。

(2) 引领蜂  $k$  对延伸指引路径  $e^k$  采用邻域搜索策略进行更新,  $k = 1, 2, \dots, \text{SN}$ 。

(3) 观察蜂  $k$  依据概率随机选择一条路径, 并采用邻域搜索策略对所选路径  $e^i$  进行更新, 选中路径  $e^i$  的概率  $P_i$  由式 (3) 求得:

$$P_i = \frac{\frac{1}{F^i}}{\sum_{j=1}^{\text{SN}} \frac{1}{F^j}} \quad (3)$$

其中,  $F^i$  为路径  $e^i$  的适应度,  $k = 1, 2, \dots, \text{SN}, i \in \{1, 2, \dots, \text{SN}\}$ 。

(4) 令单条路径最大连续搜索数为  $\text{limit}$ , 对  $e^k$  连续搜索次数进行判断, 若连续搜索次数超过  $\text{limit}$  路径  $e^k$  仍未发生变化, 则视为陷入局部最优, 舍弃该条路径, 由侦察蜂重新生成新的  $e^k, k = 1,$

2, ..., SN。

(5) 将当代所有指引路径  $e^k$  与历史最优指引路径  $e^{opt}$  的适应度进行比较, 更新最优指引路径  $e^{opt}$ 。

(6) 令算法的最大优化代数为 MEN, 若  $cycle = MEN$ , 算法终止, 最优路径为  $e^{opt}$ ; 反之,  $cycle = cycle + 1$ , 返回步骤 (2), 继续优化。

### 2.4 延伸指引路径更新策略

由 2.3 中的整体流程可知, 算法更新路径主要采用邻域搜索策略, 但实际路网结构复杂, 路径之间的邻近关系不规则, 无法直接采用函数优化中构造邻域的方法, 因此本文设计了一种适应于路网结构的邻域搜索策略, 以实现指引路径的更新, 其更新操作如下所示:

- (1) 计算路径  $e = \{e_i\}$  的适应度  $F$ , 并将其分解为  $n$  条分路径  $e_i$ , 移除所有增设指引信息。
- (2) 为分路径  $e_i$  搜索邻域分路径, 令  $i = 1$ 。
- (3) 随机选取路径  $e_i$  上两点作为邻域段的起点和终点。
- (4) 删除邻域段内节点, 重新选取该段路径, 用新生成路段补全邻域段。
- (5) 按规则添加指引信息, 并对路径重新编码, 生成  $e_i$  的邻域分路径  $e_i'$ 。
- (6) 若  $i = n$ , 转步骤 (7); 反之,  $i = i + 1$ , 转步骤 (3)。
- (7) 将邻域路径  $e_i'$  整合为  $e$  的邻域路径  $e' = \{e_i'\}$ , 计算其适应度  $F'$ , 并与  $F$  比较, 保留更优路径。

以图 4 所示延伸指引路径  $e = \{e_1, e_2\}$  为例,  $e_1$  选取  $v_{63}$  为邻域起点、 $v_{35}$  为邻域终点, 重新选取新路段组成邻域分路径  $e_1'$ , 并增设指引信息, 如图 6 (a) 所示;  $e_2$  选取  $v_{32}$  为邻域起点、 $v_{35}$  为邻域终点, 重新选取新路段组成邻域分路径  $e_2'$ , 并增设指引信息, 如图 6 (b) 所示; 将两条邻域分路段进行整合, 组成邻域路径  $e'$ , 如图 6 (c) 所示。由于  $F' < F$ , 将  $e'$  作为新的延伸指引路径  $e$  记录。

## 3 实例应用

选择广州大学城路网作为试验路网, 路网总共包括 333 个节点, 812 条路段。利用已有可达性分析模型<sup>[31]</sup>分析, A、B、C 三处都是中山大学的指引不可达路径端点, 其中 A 为华南快速路出口, C 为交叉口, B 为道路入口, 已有指引信息如图 7 所示。因此, 选择点 A、B、C 作为延伸指引路径的起点, 点 D 中山大学作为终点, 对指引路径进行综合优化。本实验

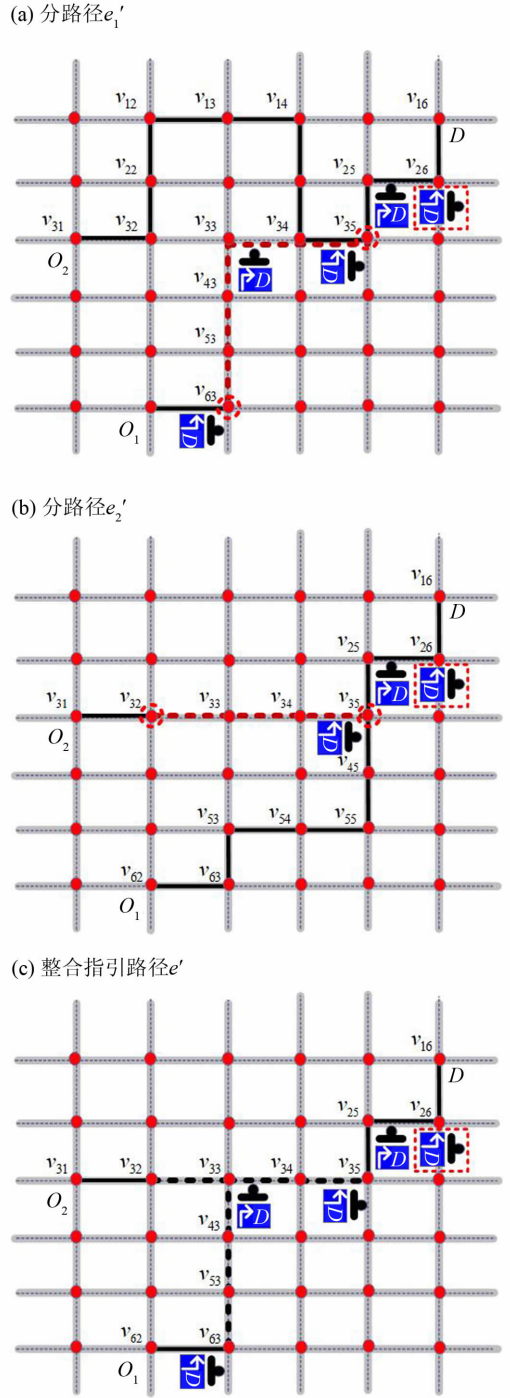


图 6 指引路径邻域搜索过程图

Fig. 6 Guide path neighborhood search process graph

认为路径长度、增设标志数对选择的贡献值相同, 因此取  $\alpha_1 = 50\%$ ,  $\alpha_2 = 50\%$ 。同时根据多次试验确定了模型的参数为  $SN = 100$ ,  $MEN = 200$ ,  $limit = 200$ , 并借助 ArcGis 10.0 平台进行了实验仿真, 程序采用 C#编程语言实现。

对图 7 运用指引路径优化模型, 可得到如图 8 所示结果。其中路径总长度为 11 510.99 m, 总共

需要增设的指引信息数为 6 个, 计算得到的适应度值为 1.196 409。

在相同条件下, 运用单条路径优化模型分别对各个起点寻找最优路径, 其各条路径寻优结果如图 9 所示, 路径信息如表 1 所示。将其直接叠加, 可

得到如图 9 (d) 所示结果。其中, 路径总长度为 11 499.99 m, 各条路径的指引信息数之和为 8 个, 其中有两个为相同指引信息, 舍弃重复信息, 因此需要设置的指引信息数为 7 个, 计算得到的其适应度值为 1.273 985。

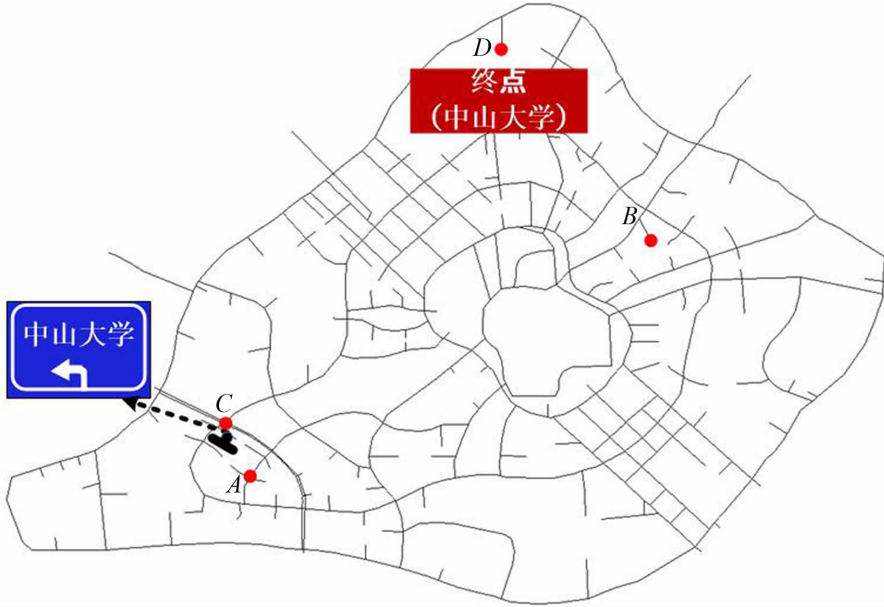


图 7 广州大学城路网

Fig. 7 Guangzhou University city road network

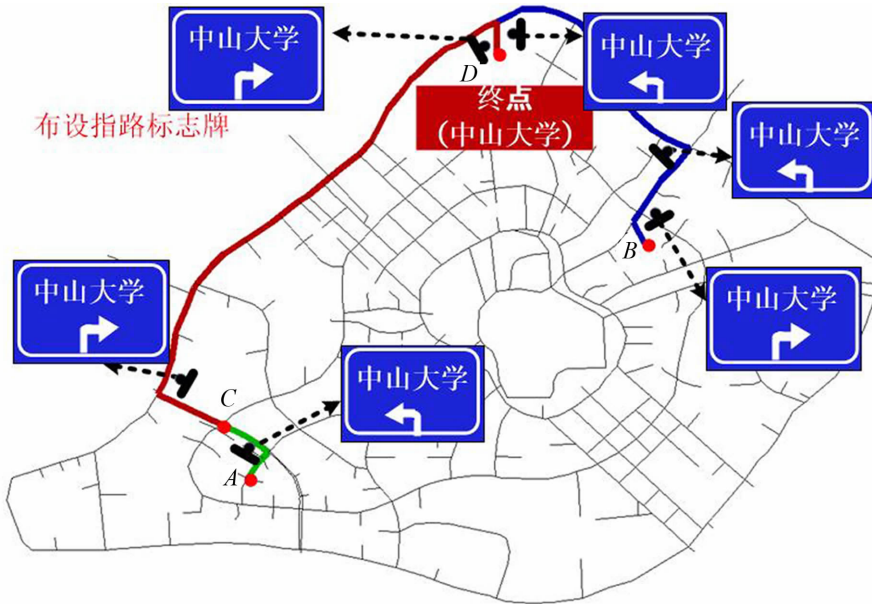


图 8 算法优化结果

Fig. 8 Algorithm optimization results

表 1 单条路径优化模型结果汇总

Table 1 Results of single source path optimization model

最优路径	指引路径的距离/m	需设指引信息数/个	适应度 $F$
$A \rightarrow D$ 优化	4 675. 878	3	0. 435 070 4
$B \rightarrow D$ 优化	2 712. 353	3	0. 582 804 6
$C \rightarrow D$ 优化	4 111. 755	2	0. 390 283 4

指引路径综合优化模型、单条路径优化模型的计算结果如表 2 所示。通过对比可发现, 综合优化模型得出的路径适应度更低, 结果更优。由此可

见, 综合优化模型在整体性考虑方面更优, 更符合实际需求。图 10 为算法的收敛曲线。可以看出, 迭代至 140 次左右时适应度已收敛至全局最小值。

表 2 结果数据对比

Table 2 Results by different methods

最优路径	指引路径长度/m	需设指引信息数/个	适应度 $F$
单独优化 (机械叠加)	11 499. 99	7	1. 273 985
综合优化	11 510. 99	6	1. 196 409

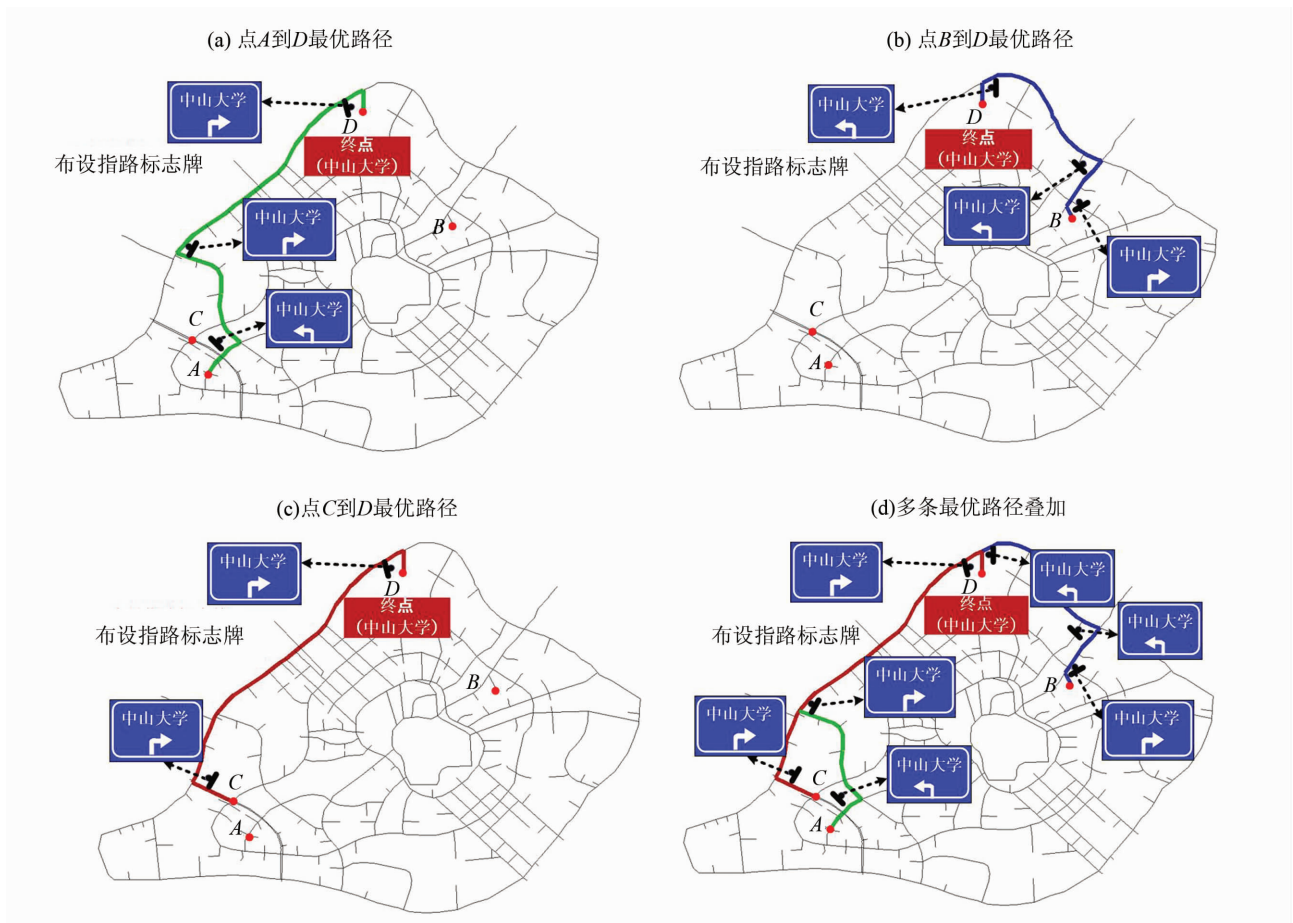


图 9 单条路径优化结果示意图

Fig. 9 Single path optimization results

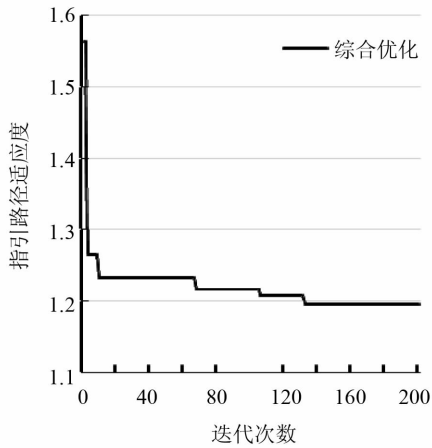


图 10 算法收敛曲线

Fig. 10 Algorithm convergence curve

## 4 总 结

本文探讨了人工蜂群算法在指引路径综合优化中的应用,提出了一种适应路网结构的邻域搜索策略,并综合考虑路径的长度、设置指引信息数两项指标,初步构建了相应的优化模型,并将其运用于实际路网。实验证明:指引路径综合优化模型具有可行性和良好的适用性,且相较于单条路径优化模型,更符合实际需求。但,目前模型只考虑了单个指引对象,当存在多个指引对象时,指引路径间会相互影响,还会出现过载现象,且模型在优化过程中考虑的影响因素等方面仍有深入研究的价值,后续研究中将会进一步扩大优化考虑范围,提高模型的实际应用性。

## 参考文献:

- [1] LIU Y C. A simulated study on the effects of information volume on traffic signs, viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search performance[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(12): 1147 - 1158.
- [2] 韩跃杰,许金良,杨宏志,等. 指路标志信息连续性评价模型[J]. 交通运输工程学报,2012,60(06):76 - 81 + 88.  
HAN Y J, XU J L, YANG H Z, et al. Continuity evaluation model of guide sign information [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 60(06):76 - 81 + 88.
- [3] 黄敏,饶明雷,李敏. 指路标志诱导系统指引连贯性的分析评价[J]. 公路交通科技,2012,203(11):110 - 114.  
HUANG M, RAO M L, LI M. Analysis and evaluation of guiding consistency in guide sign system [J]. Journal of Highway Traffic and Technology Research and Development, 2012, 203(11):110 - 114.
- [4] ZHENG J, HUANG M, LIU F, et al. Artificial Bee Colony algorithm for guiding the accessibility optimization problem of a guide sign system [M]. CICTP,2016:26 - 39.
- [5] 周竹萍,易富君. 交通网络最优路径搜索的蚁群算法[J]. 交通运输工程与信息学报,2013,40(02):24 - 30 + 53.  
ZHOU Z P, YI F J. Ant Colony Algorithm applied to optimal route search [J]. Journal of Transportation Engineering and Information,2013,40(02):24 - 30 + 53
- [6] 冷亮,杜庆东. 基于遗传算法解决车辆最优路径诱导问题[J]. 信息通信,2012,118(02):14 - 15.  
LIANG L, DU Q D. Genetic algorithm to solve vehicle routing problem [J]. Information & Communications, 2012, 118(02):14 - 15.
- [7] CHANG W A, RAMAKRISHNA R S. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002,6(6):566 - 579.
- [8] 梁静,宋慧,瞿博阳,等. 基于改进粒子群算法的路径优化问题研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,133(01):34 - 38.  
LIANG J, SONG H, QU B Y, et al. Research on path optimization based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2014, 133(01):34 - 38.
- [9] 胡中华,赵敏. 基于人工蜂群算法的 TSP 仿真[J]. 北京理工大学学报,2009,29(11):978 - 982.  
HU Z H, ZHAO M. Simulation on traveling salesman problem (TSP) based on artificial bees colony algorithm [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(11):978 - 982.
- [10] 殷霞红,倪建军,吴榴迎. 一种基于改进人工蜂群算

- 法的机器人实时路径规划方法[J]. 计算机与现代化, 2015, 235(3): 1-4.
- YIN X H, NI J J, WU L Y. An Improved Artificial Colony Algorithm for real-time path planning of mobile robot [J]. Computer and Modernization, 2015, 235(3): 1-4.
- [11] ZHANG Zhicheng, LI Jun, SHI Yaowu. Application of Artificial Bee Colony Algorithm to maximum likelihood DOA estimation [J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(1): 100-109.
- [12] ADARYANI M R, KARAMI A. Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(1): 219-230.
- [13] 郑健, 黄敏, 张腾, 等. 求解指路标志指引路径规划问题的改进人工蜂群算法[J]. 计算机应用研究, 2017(08): 2355-2359.
- ZHENG J, HUANG M, ZHANG T, et al. Modified artificial bee colony algorithm for solving path planning problem of guide signs[J]. Application Research of Computers, 2017(08): 2355-2359.
- [14] 董红利, 徐良杰, 朱顺应, 等. 基于安全和畅通交叉口合理间距的确定[J]. 交通与计算机, 2007, 139(06): 56-59.
- DONG Hongli, XU Liangjie, ZHU Shunying, et al. Determination of reasonable intersection spacing based on safety and smoothness [J]. Computer and Communications, 2007, 139(06): 56-59.
- [15] 李敏, 黄敏, 李尔达, 等. 城市指路标志诱导系统对驾驶员行为影响的分析研究[J]. 公路交通技术, 2015, 8(4): 151-155.
- LI M, HUANG M, LI E D, et al. Analytical research on influences of urban direction sign guidance system on driver behaviors [J]. Technology of Highway and Transport, 2015, 8(4): 151-155.

(责任编辑 王海蓉)