

控制与决策

Control and Decision

基于双层规划的自动卡车运输专用网络设计优化

吴鹏, 颜宝卿

引用本文:

吴鹏,颜宝卿. 基于双层规划的自动卡车运输专用网络设计优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2691–2700.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0117>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于视觉引导多AGV系统的改进A*路径规划算法](#)

Improved A* path planning algorithm for vision-guided multi-AGV system

控制与决策. 2021, 36(8): 1881–1890 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1670>

[基于平衡鲸鱼优化算法的无人车路径规划](#)

Path planning of unmanned ground vehicle based on balanced whale optimization algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2647–2655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0416>

[基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

[基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法](#)

Early warning resource allocation method for hypersonic vehicle based on bi-level programming

控制与决策. 2021, 36(2): 443–449 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0717>

[基于MCPDDPG的智能车辆路径规划方法及应用](#)

The method and application of intelligent vehicle path planning based on MCPDDPG

控制与决策. 2021, 36(4): 835–846 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0460>

基于双层规划的自动卡车运输专用网络设计优化

吴 鹏[†], 颜宝卿

(福州大学 经济与管理学院, 福州 350116)

摘要: 为保障交通系统安全性和卡车货运自动化的发展,有必要对自动卡车货物运输专用网络进行科学规划与布局. 考虑到自动卡车专用道会减少普通车辆的路权,对普通车辆的出行路径选择行为造成影响,首先从路网整体出发,以系统出行时间最小为目标,充分考虑路网普通车辆的出行路径选择行为,构建一种新的自动卡车专用运输网络设计的双层规划模型;然后提出一种基于实数编码的改进差分进化算法求解建立的双层规划模型,不仅保证解的可行性,还可避免复杂的不可行解修复过程. 通过Sioux Falls基准网络实例和大量随机算例对比测试验证了所提出模型和算法的有效性.

关键词: 自动卡车; 专用道网络; 路径规划; 双层规划; 自适应差分进化算法

中图分类号: TP18; U495 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0117

引用格式: 吴鹏,颜宝卿. 基于双层规划的自动卡车运输专用网络设计优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2691-2700.

Optimal design of dedicated network for automated truck transportation based on bi-level programming

WU Peng[†], YAN Bao-qing

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Scientific planning of a dedicated network for automated truck cargo transportation is necessary to ensure the transportation system safety and the development of truck cargo automation. Considering the dedicated lanes for automated trucks will reduce the right-of-way of general-purpose vehicles and impact the travel path selection behavior of general-purpose vehicles, firstly, this paper develops a new bi-level programming model for designing a dedicated transportation network for automated trucks to minimize the system travel time by considering general-purpose vehicles' travel path selection behavior from the perspective of the overall system. Then, an improved differential evolutionary algorithm based on a real number coding is proposed to solve the established bi-level program, specifically including a preprocessing strategy based on the problem characteristics and efficient real number coding rules, which not only ensures the feasibility of the solution but also avoids the complex infeasible solution repair process. Finally, the effectiveness of the model and algorithm is verified by the experimental results of the Sioux Falls benchmark network and a large number of randomly generated instances.

Keywords: automated truck; dedicated lane network; route planning; bi-level programming; adaptive differential evolutionary algorithm

0 引言

近年来,5G技术和人工智能的迅速发展加快了智能化社会的进程.5G技术和人工智能的普及应用将很大程度推进车联网的快速构建和自动驾驶的实现与成熟,在智能交通领域体现得尤为明显^[1].自动驾驶发展的重要组成部分之一是自动卡车.在旺盛的

物流需求背景下,自动卡车货物运输具有相对固定的运输路线与需求刚性的特点,相对于自动驾驶承运车具有更加容易落地与商业化的优势,如图森未来公司已在美国实现了自动驾驶货运服务^[2-3].另一方面,在完全实现自动驾驶之前,人工驾驶车辆与自动驾驶车辆混行的过渡阶段将长期存在,如何在该阶段安全、

收稿日期: 2022-01-16; 录用日期: 2022-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71701049,71871159,71901069); 福建省自然科学基金项目(2020J05040); 教育部人文社科规划基金项目(21YJA630096); 福建省雏鹰计划青年拔尖人才计划项目(0470-00472214); 福建省科技经济融合服务平台资助项目(0300-82321069).

[†]通讯作者. E-mail: wupeng88857@126.com.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

高效地管理混合交通流成为保障高质量交通发展的重要现实问题^[4]. 因此,在未来复杂的混行道路环境中,首先为自动卡车货运规划专用运输网络是保障道路安全、运输效率并促进自动驾驶技术发展的有效举措,具有重要的现实意义.

专用道策略是一种提供与其他车辆分离道路的经济、有效的方法,具体是指在现有城市交通网络中选择部分路段的车道设置成为仅供特定车辆使用的专用车道,为其提供相对安全畅通的道路条件提高运输效率. 然而,在城市化进程不断加快的时代,为自动卡车设置专用车道会使普通车辆可使用的道路空间减小,很可能使原本的交通状况更加糟糕,对整个系统的普通车辆造成负面影响. 如何科学合理地规划自动卡车运输专用道网络,有效分配路网资源,保障自动卡车运输任务效率与专用车道造成的负面影响之间的权衡至关重要. 因此,本文将在5G、人工智能不断推进自动驾驶发展的背景下,重点研究未来自动卡车运输专用网络的设计优化问题.

目前,专用道设置规划问题(lane reservation problem, LRP)得到了国内外研究学者的广泛关注. 研究应用场景主要可分为特殊事件的临时专用道设置规划、危险品运输的专用道设置规划、自动卡车专用道设置规划以及公交专用道的设置规划等方面. 绝大多数研究集中于公交专用道优化. 如文献[5]提出一种动态公交专用道设置策略,以交叉路口平均延误最小化为目标建立混合整数非线性规划. 文献[6]针对部分路段旅行时间信息,研究随机公交车专用道优化问题,提出面向服务的分布式鲁棒优化模型. 少部分研究了特殊事件的临时专用道和危险品专用道设置规划. 如文献[7]研究运输任务合并下的大型运动专用道设置问题,建立整数线性规划. 文献[8]同时考虑剩余容量和预算限制建立双目标整数规划模型,并提出新的松弛优化求解算法. 文献[9]以总体出行成本最小、专用道影响最小、专用道利用率最大建立双层规划模型,并采用NSGA-II算法求解. 自动卡车运输专用道优化问题研究很少,然而在5G、人工智能技术背景下,自动驾驶的成熟实现势不可挡,很有必要提前为自动卡车规划专用运输网络,为未来混行交通状态提供理论和实践参考. 在微观层面,文献[10]为精确评估大规模路网引入自动货车车道引起的交通流变化提出一种微观-中观交通仿真器,结果表明为自动货车提供专用道会导致广泛的道路网络交通流变化. 在宏观层面,文献[11]首次将专用道策略引入自动卡车货物运输研究中,优化专用道路段选

择并为自动卡车运输任务规划专用道路,提出整数线性规划模型并验证了问题的NP难特性. 随后,文献[12]在文献[11]的基础上提出有效不等式,建立了新的整数线性规划并提出求解大规模问题的两阶段精确算法.

上述成果在一定程度上丰富了专用道设置规划研究,但还存在以下不足: 1) 现有文献对于路段上存在车道被设置为专用道后,将原本在该车道上行驶的普通车辆直接移至该路段上剩余的普通车道上,而不考虑部分车辆可能的重新路径选择,不能很好地反映自动卡车专用道规划后对系统的影响. 2) 现有文献考虑普通车辆路径选择行为后,大多用于求解小规模算例,如何开发适合中大规模算例的求解算法值得进一步思考. 因此,本文将针对上述研究问题与挑战,进一步分析自动卡车专用车道和普通车辆之间的动态相互影响关系,建立一类新的关于自动卡车专用运输网络优化的双层规划模型,同时针对自动卡车专用运输网络规划的问题特性开发了基于实数编码改进差分进化算法(improved differential evolutionary algorithm, IDEA),利用不同规模的案例验证算法与模型的有效性.

1 问题描述及符号定义

1.1 问题描述

本文采用有向图 $G(N, A)$ 表示城市交通网络,其中 N 代表网络节点的集合,每个节点表示实际交通网络的交叉路口; A 表示城市交通网络的弧集合,每条弧表示实际道路路段. 每个运输任务都有对应的起讫点(OD)以及严格的时间限制. 为保障运输任务的准时完成,需要将部分车道转化为仅供自动卡车运输任务行驶的专用车道,以提高自动卡车运输任务的效率和安全性. 此外,为促进自动驾驶的不断成熟以及安全性,要求自动卡车运输任务所经过的路径均设置专用道. 但是,一旦某些路段上设置了专用道,将会对该路段上的普通车辆产生负面影响,使该路段上普通车辆可使用的道路容量降低,造成道路拥挤,行驶时间增大. 与此同时,城市网络的交通状态也将改变,专用道路段上原本的普通车辆可能重新进行路径规划,导致网络中的普通车辆流量重新分配. 而普通车辆的路径规划结果反过来又将直接决定路网整体行驶时间,影响了专用道布局方案. 因此,本文从系统的角度出发,充分考虑专用道与普通车辆之间的相互影响,以专用道负面影响最小为目标,确定能够保证运输任务都能准时完成的专用道优化设置方案.

1.2 假设条件

- 1) 每条路段至少2个车道, 确保设置专用道后普通车辆还可以在当前路段行驶;
- 2) 每条路段至多有1个车道为专用道;
- 3) 每个任务从其起点到讫点之间存在可行路径.

1.3 符号说明

- N : 网络节点集合, $i \in N$.
- A : 网络弧集合, $a \in A$.
- K : 任务集合, $k \in K$.
- O : 任务起点集合, $o_k \in O \subseteq N$.
- D : 任务终点集合, $d_k \in D \subseteq N$.
- B_i : 从节点 i 发出的弧的集合, $i \in N, B_i \subseteq A$.
- F_i : 进入节点 i 的弧集合, $i \in N, F_i \subseteq A$.
- RS : 普通车辆OD对集合, $rs \in RS$.
- P_{rs} : OD对 rs 的可行路径集合, $rs \in RS, p \in P_{rs}$.
- Q_{rs} : OD对 rs 的出行需求, $rs \in RS$.
- n_a : 路段 a 的车道数, $a \in A$.
- c_a : 路段 a 的通行能力, $a \in A$.
- τ_a^0 : 普通车辆在路段 a 通用车道的自由流时间, $a \in A$.
- τ_a^1 : 自动卡车在路段 a 的专用车道的行驶时间, $a \in A$.
- T_k : 任务 k 的限制时间, $k \in K$.
- $\delta_{p,a}^{rs}$: 当OD对 $rs \in RS$ 的可行路径 $p \in P_{rs}$ 经过路段 $a \in A$ 时, $\delta_{p,a}^{rs} = 1$; 否则, $\delta_{p,a}^{rs} = 0$.
- α, β : BPR函数的参数.
- z_a : 当路段 a 设置了专用道, $z_a = 1$; 否则, $z_a = 0$.
- x_a^k : 当路段 $a \in A$ 设置了专用道且被任务 $k \in K$ 经过, $x_a^k = 1$; 否则, $x_a^k = 0$.
- f_p^{rs} : OD对 $rs \in RS$ 的路径 $p \in P_{rs}$ 的流量.
- y_a : 普通车辆在路段 $a \in A$ 的流量.
- t_a : 普通车辆在路段 $a \in A$ 的旅行时间.

1.4 路段旅行时间与路段流量的关系

与以往将普通车辆旅行时间作为已知参数的研究不同, 本文对于普通车辆在路段上旅行时间的描述是动态的, 随着道路条件以及车辆分布情况而改变. 本文采用美国公路局函数——BPR函数描述路段行驶时间与路段流量及道路通行能力的关系. 在BPR函数中, 路段行驶时间与路段流量成正比, 充分体现出拥挤效应. 例如针对路段 a , 道路通行能力为 c_a , 车道数为 n_a , 在没有设置专用道时, 普通车辆可以使用所有车道, 该路段在单位时间内能通过的普通车辆流量为 c_a . 一旦在路段 a 上将一条车道设为自动卡车专用的车道, 普通车辆在该路段可使用的车道数为

$n_a - 1$, 可容纳的普通车辆数减小, 该路段在单位时间内能够通过普通车辆流量降为 $c_a(n_a - 1)/n_a$, 则考虑是否设置自动卡车专用道下普通车辆的路段旅行时间表示为

$$t_a = \begin{cases} \tau_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{y_a}{c_a} \right)^\beta \right], & z_a = 0; \\ \tau_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{y_a n_a}{(n_a - 1) c_a} \right)^\beta \right], & z_a = 1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: α, β 的值根据文献[13]设定, 分别为0.15和4.0.

2 模型建立

根据以上描述, 本节对自动卡车运输专用网络设计规划问题建立如下双层规划模型.

$$UP: \min f_1 = \sum_{a \in A} t_a y_a. \quad (2)$$

$$s.t. \sum_{a \in B_i} x_a^k = 1, i = o_k, \forall k \in K; \quad (3)$$

$$\sum_{a \in F_i} x_a^k = 1, i = d_k, \forall k \in K; \quad (4)$$

$$\sum_{a \in B_i} x_a^k = \sum_{a \in F_i} x_a^k, \quad \forall i \in N \setminus \{o_k, d_k\}, \forall k \in K; \quad (5)$$

$$\sum_{a \in A} x_a^k \tau_a^1 \leq T_k, \forall k \in K; \quad (6)$$

$$x_a^k \leq z_a, \forall a \in A, \forall k \in K; \quad (7)$$

$$x_a^k, z_a \in \{0, 1\}, \forall a \in A, \forall k \in K. \quad (8)$$

$$LP: \min f_2 = \sum_{a \in A} \int_0^{y_a} t_a(x) dx. \quad (9)$$

$$s.t. \sum_{p \in P_{rs}} f_p^{rs} = Q_{rs}, \forall rs \in RS; \quad (10)$$

$$y_a = \sum_{rs \in RS} \sum_{p \in P_{rs}} f_p^{rs} \delta_{p,a}^{rs}, \forall a \in A; \quad (11)$$

$$y_a \geq 0, \forall a \in A; \quad (12)$$

$$f_p^{rs} \geq 0, \forall p \in P_{rs}, \forall rs \in RS. \quad (13)$$

上层规划模型描述从整个系统角度如何确定自动卡车专用运输网络方案, 使得在保证所有任务能够准时完成的情况下对普通车辆影响最小. 式(2)为上层模型的优化目标, 表示专用道方案对整个系统的影响最小化, 用所有普通车辆的旅行时间来表示; 式(3)表示对于任意运输任务, 从任务起点发出的弧只有一条; 式(4)表示对于任意运输任务, 进入任务讫点的弧只有一条; 式(5)表示对于任意运输任务, 除起讫点外其他节点的流量平衡约束; 式(3)~(5)表示对于任意运输任务, 有且仅有一条无环运输路径; 式(6)表示对于任意运输任务路径的实际旅行时间均不能超过时间限制; 式(7)表示仅当路段设置专用道时, 运输任务

才能完成;式(8)表示 x_a^k, z_a 为0-1 决策变量.

下层规划模型采用 Beckmann 等价模型描述在对应专用道方案下,普通车辆的路径选择行为. 所有普通车辆都以力图最小化各自最短出行成本为目的,最终将达到一种用户均衡状态. 在用户均衡状态下,连接每个出行 OD 对的所有被使用的路径有相同的旅行时间,且小于等于任何未被使用过的路径旅行时间^[14]. 式(9)是下层模型的优化目标,为每条路段旅行时间积分的累加;式(10)表示对任意 OD 对的路径流量与 OD 需求之间的守恒关系;式(11)表示路段流量与路径流量之间的相互关系;式(12)、(13)表示决策变量的取值范围.

3 算法设计

双层规划模型是 NP 难问题^[15]. 由于本文建立的双层规划模型是非线性模型并且很难将问题转化为线性模型,不具备良好的问题特性,本文选用差分进化算法(differential evolutionary algorithm, DEA)内嵌 FrankWolfe 算法^[16]对双层规划模型进行求解.

传统求解专用道优化问题,通常用 0-1 编码表示专用道的设置与否. 一旦道路网络规模增大,该编码方式将造成过度冗长的个体,搜索空间极度增大. 此外,自动卡车专用道设置问题要求每个任务路径的专用道是连续的,对解的要求严苛,不易生成可行解,通常需要伴随复杂的解修复过程. 为此,本文提出一种基于实数编码的 IDEA 解决考虑普通车辆路径选择的自动卡车专用运输网络优化问题.

3.1 预处理

令交通网络中所有路段都有一条车道作为自动卡车专用道,可得一个完全专用道网络,并将其命名为 G' . 在 G' 中可以为每个任务规划运输路径,计算任务路径旅行时间. 在 G' 中每个任务满足其时间限制的路径数量是有限的,是可以枚举的. 可以发现,只要从每个任务满足时间限制的可行路径集合中随机选择一条路径进行组合而得到的路段集合就是一个可行的专用道方案. 此外, Yen 的 K 最短路径算法^[17]是用于枚举任意起讫点间所有无环路径的有效方法. 所以,本文将该方法应用于所有满足任务时间限制的无环路径以及对应完成时间的枚举.

对于任意运输任务 $k \in K$,令 H_k 表示存放任务 k 在 G' 中满足时间限制的所有路径集合,其元素表示形式为

$$H_k = \{h_k^1, h_k^2, \dots, h_k^{m_k}\}, \forall k \in K. \quad (14)$$

运输任务个数记为 $\text{Count}(K)$,就有 $\text{Count}(K)$ 个按照式(14)表示的对应任务可行路径集合. 其中 H_k 中的

元素按照路径旅行时间从小到大放置,元素个数即为任务 k 的可行路径数目,记为 $\text{Count}(H_k)$. 每个元素表示一条路径,是一个存放路段的集合. 比如对于元素 $h_k^{m_k}$ 是一个集合,其下标表示任务 k ,上标表示任务 k 的第 m_k 条可行路径. 元素 $h_k^{m_k}$ 集合内部元素是能够组成从任务 k 起点到终点的路段集合,对应表示形式为

$$h_k^{m_k} = \{a_{m_k}^1, a_{m_k}^2, \dots, a_{m_k}^i\}, \forall k \in K. \quad (15)$$

从每个任务的可行路径集合随机抽取一个元素,将 $\text{Count}(K)$ 个可行路径组合可得到一组可行的专用道方案. 并且,被抽取的 $\text{Count}(K)$ 个可行路径表示在当前专用道方案下,满足所有任务时间限制的任务路径规划. 按照该方式生成初始解不仅能够保证专用道方案的可行性,避免传统方法对解修复的复杂过程,且能够在可行专用道方案下直接规划出所有任务的运输路径,极大提高算法效率.

3.2 编码与解码

根据上述预处理过程,将每个任务在 G' 中所有满足时间限制的可行路径枚举,并用集合 $H_k(\forall k \in K)$ 表示. 自动卡车专用道规划问题采用实数编码方式,每个个体长度为任务个数 $\text{Count}(K)$,每个元素的值表示当前任务在 G' 中的可行路径编号. 假设 $|K| = 4$ 表示有 4 个自动卡车运输任务,任务 1~任务 4 的 OD 对分别为 (3,8)、(5,10)、(11,2)、(1,14),任务 1~任务 4 在 G' 中满足时间限制的可行路径数目分别为 5、4、9、6,则自动卡车专用道设置规划问题的一个可行解的编码与解码可用图 1 表示.

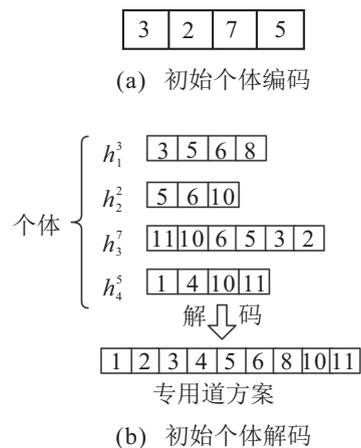


图 1 编码与解码

由图 1(a)可知,个体元素值对应任务可行路径编号,必须对应任务最短路径数目 $\text{Count}(k), \forall k \in K$. 从图 1(a)的编码中并不能直接得到需要在哪些路段上设置专用车道,需要根据任务对应的路径编号从存放该路径集合中抽取对应路段. 对应的解码

如图1(b)所示. 通过上述编码方式能够方便地表示可行解, 缩短个体长度, 降低解搜索空间, 提高算法效率.

3.3 种群初始化

设置初始种群规模为NP, 最大迭代次数为MaxIter, 用g表示第g次迭代, S_i^g 表示第g代的i个体. 初始种群可表示为 $P_0 = \{S_1^0, S_2^0, \dots, S_i^0, \dots, S_{NP}^0\}$. 预处理后, 可行解的生成变得简单易行. 故本文在种群初始化对每个个体的元素值采用随机生成方式, 随机规则如下:

$$s_{i,j}^0 = \text{rand} [1, \text{Count}(H_j)], \forall j \in K. \quad (16)$$

式(16)表示初始种群的第i个个体的第j个元素值, 是在任务1到任务j的可行路径数目Count(H_j)之间随机生成整数作为初始值. 其他任意个体的各个位置的元素值的初始化按照同样的规则生成初始值, 确保初始可行解的生成.

3.4 变异

本文采用DE/current-to-best/1策略实现变异操作, 具体表现为

$$V_i^g = S_i^g + F(S_{\text{best}}^g - S_i^g) + F(S_{p_1}^g - S_{p_2}^g), \quad p_1 \neq p_2 \neq i; \quad (17)$$

$$F = F_0 2^\lambda, \lambda = e^{-\left(\frac{g}{g_{\max} + 1 - g}\right)}. \quad (18)$$

其中: V_i^g 为变异个体; S_{best}^g 为当前最优个体; S_i^g 表示目标个体; $S_{p_1}^g, S_{p_2}^g$ 分别为第g次迭代的2个互不相同的个体; F是缩放因子, 控制差分向量对变异个体的影响. 固定的F不能够满足算法迭代过程对于不同阶段扰动的需求, 故本文对F采用随着迭代过程变化的自适应策略^[18]. 如式(18)所示, 让F随着迭代次数不断地减小, 然后无限逼近于 F_0 , 使算法从迭代初期具有较高的种群多样性, 迭代后期具有较强的寻优能力.

3.5 交叉

本文采用单点交叉的方式实现交叉操作, 即

$$U_{i,j}^g = \begin{cases} V_{i,j}^g, & \text{rand}(0, 1) \leq \text{CR} \text{ or } j = j_{\text{rand}}; \\ S_{i,j}^g, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{CR} = \text{CR}_{\min} + \text{rand}(0, 1)(\text{CR}_{\max} - \text{CR}_{\min}). \quad (20)$$

其中: $V_{i,j}^g, S_{i,j}^g, U_{i,j}^g$ 分别表示变异个体、目标个体、实验个体在第g次迭代的第j个元素; CR表示交叉因子, 决定了变异个体和目标个体对实验个体的贡献. 与F相同, 固定的CR不能满足迭代不同阶段的需求, 故令CR每次迭代在固定区间随机生成不同的值, 避免陷入局部最优.

3.6 选择

本文选用轮盘赌规则按照个体适应度大小进行选择操作. 在此之前对适应度函数进行对应设置, 即

$$\text{fitness}(S_i^g) = \frac{M}{f_1(S_i^g)}. \quad (21)$$

$$S_i^{g+1} = \begin{cases} U_i^g, & \text{fitness}(U_i^g) \geq \text{fitness}(S_i^g); \\ S_i^g, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

其中: $f_1(S_i^g)$ 表示个体 S_i^g 所表示的专用道方案下普通车辆的延误, 该值通常很大, 因此引入一个很大的数M作为分子来放大适应度函数.

3.7 停止条件

判断是否达到最大迭代次数, 若是, 则算法停止并返回最优解决方案以及对应的目标函数值; 否则, 返回变异操作.

4 案例分析

为了验证本文构建的模型和改进算法的有效性, 以Sioux Falls为案例, 与不同场景下求解的专用道方案进行效果对比分析. 此外, 为验证IDEA中预处理与实数编码结合的有效性, 随机生成仿真算例进行测试, 与传统0-1编码的差分进化算法(BDEA)进行对比.

Sioux Falls路网包括24个节点、76条路段、528个OD对. 道路网络结构如图2所示, 其中圆圈表示节点, 有向弧表示路段. 表1列举了自动卡车运输任务的起讫点以及对应的时间限制, 并预先使用Yen算法求解对应任务在 G' 的最短路径条数.

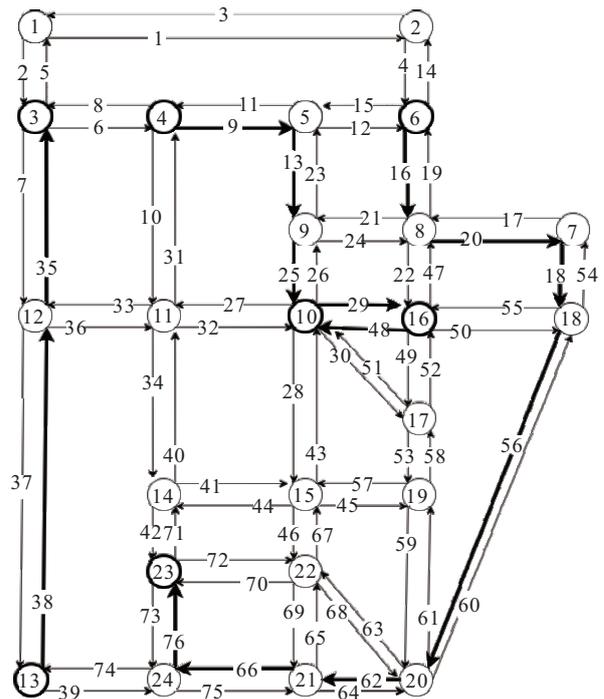


图2 Sioux Falls网络结构

表1 运输任务起讫点及限制时间

任务编号	起点	终点	限制时间	K 最短路径数
1	4	16	20	15
2	6	23	22	33
3	13	3	23	5
4	16	10	25	28

4.1 参数敏感性分析

DEA的控制参数主要包括NP、F、CR,选取合适的控制参数对于算法的性能至关重要.由于算法不同阶段对控制参数的要求不尽相同,固定的控制参数存在一定的缺陷,本文对F、CR采用自适应形式,在不同进化阶段动态调整,以改善算法的性能.由于CR的自适应规则需要选定CR_{min}以及CR_{max},不易以参数敏感性分析的方法来确定,则以通常的经验规则令CR_{min} = 0.2, CR_{max} = 0.9.而对于NP、MaxIter、F,以敏感性分析来确定相对合适的参数值,以保证算法相对优良的求解质量和效率.

4.1.1 种群规模敏感性分析

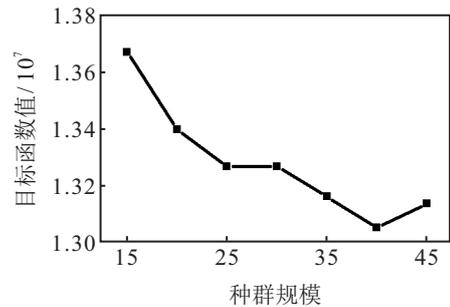
对于NP的数值一般是在区间[5D,10D]之间,其中D为个体的维度.在Sioux Falls案例中个体维度为4,合适的NP值在区间[20,40]内.为分析NP对于模型求解的影响,在[15,45]范围内,以5为间隔选取7个不同的数值作为NP进行敏感性测试.根据选取的7个值对模型进行相应的求解计算,每个值在模型中重复进行计算20次并将求解结果的计算均值作为当前NP值所得的目标函数值.最终,将7个不同NP值计算的平均目标函数值绘制成曲线,如图3(a)所示.由图3(a)可知,随着NP的增大,目标函数值总体呈下降趋势,当NP为40时,曲线达到最低点,目标函数最小,则在该案例中可以将40作为最佳的NP.

4.1.2 迭代次数敏感性分析

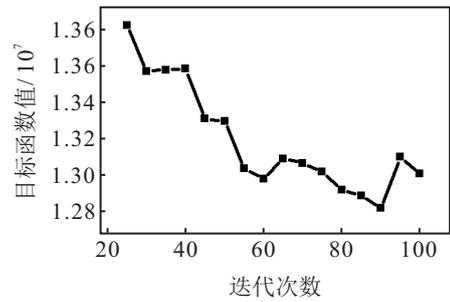
在区间[25,100]以5为间隔选取16个值,以上述同样过程将每个参数代入模型重复计算20次取目标函数均值,得到关于迭代次数与目标函数值之间的关系曲线如图3(b)所示.由图3(b)可知,随着迭代次数的增加,模型目标函数值呈下降趋势,当迭代次数为90时,目标函数达到最小,说明在该案例可将90作为最佳迭代次数.

4.1.3 缩放因子敏感性分析

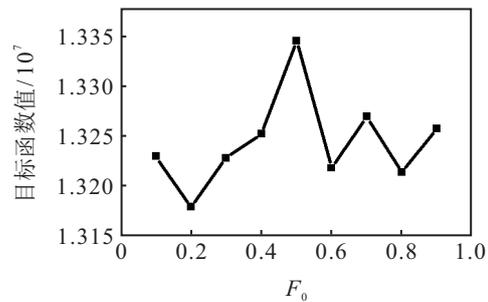
本文对缩放因子采用自适应策略,F与F₀呈2倍正相关关系,可以以F₀的取值变化表示F的敏感度.此外,通常缩放因子的取值区间在[0,2)范围,故本文在区间[0.1,0.9]以0.1为间隔取值作为F₀的值,对应的F值属于[0,2),按上述流程一一代入模型分



(a) 种群规模敏感性分析



(b) 迭代次数敏感性分析



(c) 缩放因子敏感性分析

图3 参数敏感性分析

别求解20次取目标函数均值,得到F₀与目标函数值的关系曲线如图3(c)所示.由图3(c)可知,当F₀小于0.5时,随着F₀的增大目标函数值呈先减小后增大的趋势,当F₀为0.5时,目标函数达到最大值,随着F₀的增大目标函数值呈震荡波动.在当前案例中,当F₀取0.2时,目标函数取得最小,可将0.2作为本案例最优的F₀值.

4.2 实例分析

本文考虑了普通车辆的路径选择,并采用用户均衡原则描述交通网络中普通车辆路径选择的流量分布情况.在有出行需求的交通网络中,无论是否设置专用车道出行者都会进行路径选择,为了检验本文提出的双层规划模型的效果,以Sioux Falls网络为实例,在表2中所描述的网络场景中,分别考虑普通车辆的路径选择行为进行用户均衡交通分配,比较这3种场景下的系统总时间.令s为场景集合,则在不同场景下交通分配的路段流量、路段旅行时间、系统总旅行时间可以分别表示为y_a^s、t_a^s、f₁^s,其中f₁^s = ∑_{a∈A} t_a^sy_a^s.

表 2 场景描述

场景编号	场景描述
1	无专用道网络
2	根据文献[11]中的模型求解而得到的专用道网络
3	根据本文模型求得的专用道网络

在 Sioux Falls 网络中不考虑专用道的设置, 假设所有普通车辆的出行需求与双层模型使用的数据相同, 按照用户均衡规则对社会车辆进行交通分配, 可得到在所有普通车辆达到用户均衡时各路段的旅行时间以及对应的流量分布情况. 经过求解可知, 无专用道下普通车辆达到用户均衡的系统总时间 f_1^1 为 1.37411×10^7 .

根据文献[11], 不考虑普通车辆路径选择行为的自动卡车专用道设置优化问题的线性规划模型, 令其在 Sioux Falls 网络中使用 Cplex 进行求解, 可以得到一组符合文献[11]的最优专用道设置方案, 即令路段编号为 9, 12, 16, 22, 27, 34, 42, 48, 35, 38, 48 的路段设置专用道. 为了验证路径选择的重要性, 按照文献[11]模型求解的专用道设置方案将 Sioux Falls 网络的对应路段设置为专用道, 并在这样的交通网络中对普通车辆进行流量分配, 验证专用道方案的实际效果. 经过求解可得, 在以上线性规划所得的专用道方案下, 普通车辆在该网络中进行流量分配达到用户均衡时的系统总时间 f_1^2 为 1.7774×10^7 .

根据 DEA 的各个参数敏感性分析结果确定 Sioux Falls 案例中各参数的取值如下: MaxIter 为 90, NP 为 40, F_0 为 0.2, CR_{min} 和 CR_{max} 分别为 0.2 和 0.9. 将 Sioux Falls 案例路网的相关数据代入双层规划模型, 利用 IDEA 求解得到最优专用道方案. 根据求解结果, 需令路段编号为 9, 13, 16, 18, 20, 25, 29, 35, 38, 48, 56, 62, 66, 76 的路段设置专用车道, 对应的目标函数(即系统总时间) f_1^3 为 1.2658×10^7 . 在该专用道方案下, 自动卡车的路径规划如图 2 加粗表示. 在该专用道方案下任务 1~任务 4 规划的路径(由路段编号组成)分别为: $9 \rightarrow 13 \rightarrow 25 \rightarrow 29, 16 \rightarrow 20 \rightarrow 18 \rightarrow 56 \rightarrow 62, 38 \rightarrow 35, 29$.

在 Sioux Falls 网络中, 按照表 2 所述的 3 种网络场景, 分别考虑普通车辆的路径选择行为, 以用户均衡交通分配的规则求解对应场景下系统总时间, 用图 4 表示各场景的求解结果变化.

对比场景 1 与场景 2 可知, 按照文献[11]的线性规划模型求得的最优专用道方案, 应用于实际用户做出路径选择达到用户均衡而得的系统总时间, 相对于

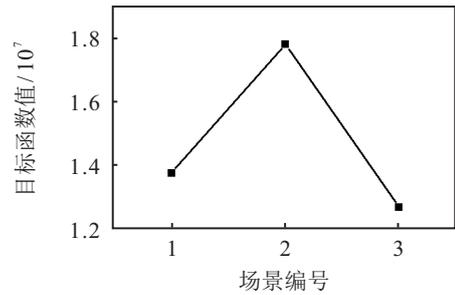


图 4 不同场景系统总时间变化

无专用的情况下普通车辆交通分配所得的系统总时间增加了 4.0329×10^6 , 是无专用道情况下系统总时间的 1.3 倍, 表明在交通网络中设置专用道将造成普通车辆可使用的道路资源减少, 对普通车辆的旅程造成延误, 对专用道的位置选择非常重要. 对比场景 2 与场景 3 可知, 场景 3 的系统总时间比场景 2 的系统总时间减少了 28.79%, 表明双层规划模型所求解的专用道方案比文献[11]的线性规划模型所求解的专用道方案更优, 大幅提高了交通网络的效率. 文献[11]的最优专用道方案不符合具有普通车辆的路径选择行为的专用道规划, 很难适用于现实情境. 本文所提出模型的专用道方案能够有效减少自动卡车专用道对交通系统的影响, 改善交通系统运行效率.

对比场景 1 与场景 3 可知, 在根据本文的双层规划模型求解得到的专用道方案下, 对普通车辆进行用户均衡交通分配得到的系统总时间比无专用道下普通车辆的用户均衡分配的总时间更小, 仅为无专用道下的 92.12%. 结果表明在同一交通网络中, 对某些路段设置专用车道, 降低了普通车辆可使用的道路容量, 如果在按照用户均衡原则描述普通车辆的路径选择行为的情况下, 并不一定会导致普通车辆系统总时间增加, 则会出现 Brass 悖论^[6]. 本文的上层模型是从系统的角度出发力图减小专用道对整个交通网络的影响, 下层模型则是在系统方案下, 从普通车辆的用户角度出发力图减小每个普通车辆的旅行时间. 由模型分析可知, 上层极小化系统网络时间的目标与下层普通车辆极小化各自出行时间的目标, 两者之间的矛盾导致了 Brass 悖论的产生. 结果说明交通规划部门在设置专用道时谨慎并经过系统地分析, 设置专用道并不绝对会增加系统总时间, 在某些关键路段上设置专用道甚至可以比无专用道情况下的系统总时间更小, 从而使得整个交通网络的交通拥挤程度减少, 直接体现了专用道位置选择的重要性. 此外, 侧面说明在以扩大道路容量来达到缓解交通状况的措施时, 必须谨慎合理地选择关键路段, 否则很可能导致整个网络中拥挤程度的加剧.

4.3 随机算例分析

上述案例的交通网络规模不大并不能很好地说明IDEA的性能. 本文为了更好地验证IDEA相对于BDEA更加优良的求解性能, 随机生成一系列不同的非任务出行需求、自动卡车运输任务, 令其在一系列不同规模的交通网络中进行测试. 用(节点数, 有向弧数)来表示各规模的交通网络, 本文主要有(50, 204)、(60, 242)、(70, 284)、(80, 322)、(90, 360)、(100, 398)六种规模的交通网络. 交通网络上的参数设置规则如下: 对每个有向弧的车道数随机从2,3挑选确定, 路段容量按照每条车道1 100 pcu/h进行计算, 普通车道自由流时间在[5, 50]随机生成, 专用道行驶时间为对应普通车道自由流时间的70%. 此外, 为了验证在不同网络下非任务出行需求、自动卡车运输任务的变化对算法效果的影响, 随机生成非任务需求

为50, 60, 70, 80, 90, 100, 自动卡车运输任务个数为4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 分别测试算法的性能.

自动卡车运输任务数与专用道的负面影响息息相关. 因此, 本文在6种不同规模的交通网络上, 固定非任务出行需求的个数为100, 测试各规模网络下两种算法随着自动卡车任务变化的算法性能. 图5分别描述了不同交通规模下, BDEA和IDEA的求解效果随自动卡车运输任务个数变化. 由图5可知, 从网络规模50节点至100节点的交通网络中, 随着自动卡车任务的变化, IDEA的曲线总是在BDEA的曲线之下, 表示在不同规模网络上随着自动卡车任务个数变化, IDEA求解的专用道优化方案更加有效, 表明了算法的优越性. 例如在50节点网络规模下, 当自动卡车任务个数为6时, IDEA与BDEA所得的目标函数分别为3 355 430、3 180 920, IDEA比BDEA降低了

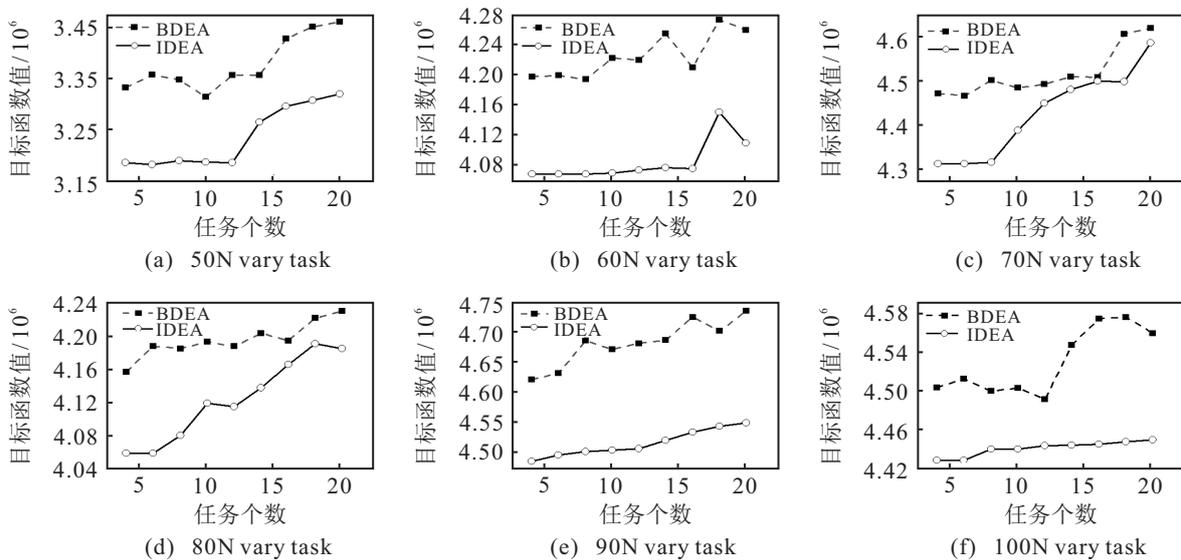


图5 各网络规模随任务个数变化的求解结果

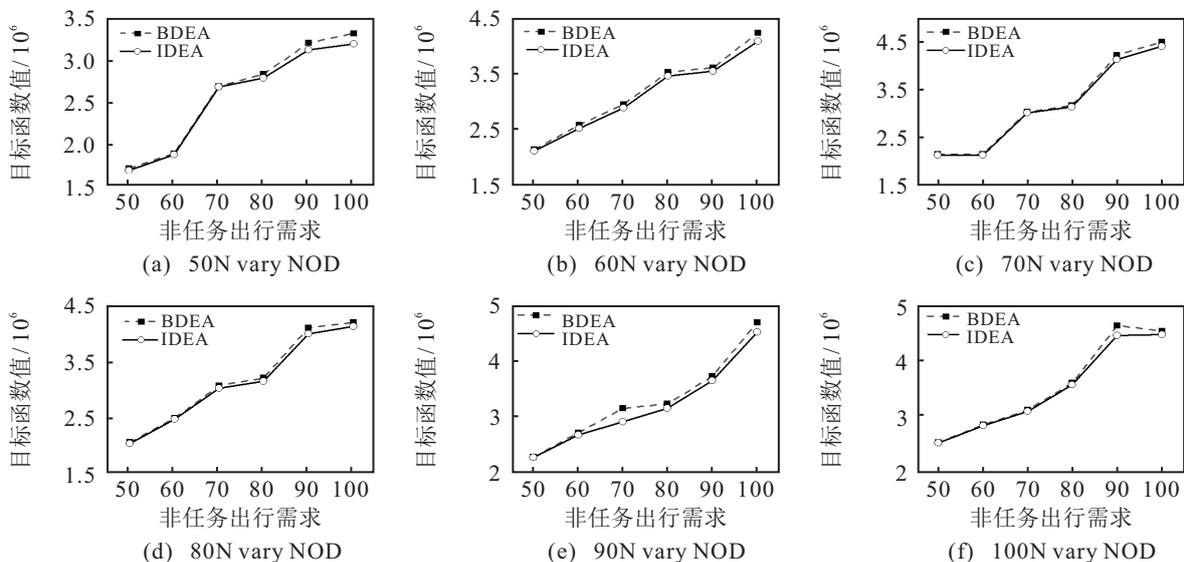


图6 各网络规模随普通车辆出行需求变化的求解结果

5.2008%的负面影响. 相对于BDEA, IDEA在一定程度上降低了设置专用道对整个网络系统的负面影响, 优化了系统效率.

此外, 普通车辆出行需求对普通车辆路段旅行时间的变化具有密不可分的联系. 本文在6种交通网络规模下, 固定自动卡车运输任务个数为10, 测试在各规模网络下BDEA和IDEA随着普通车辆出行需求变化的求解效果. 图6表示在不同交通网络下, 随着普通车辆出行需求数的增大, 两种算法求解质量的变化情况. 由图6可知, 从网络规模50节点至100节点的交通网络中, 随着普通车辆出行需求数的变化, IDEA的求解效果均优于BDEA. 但是, 代表两种算法的曲线差距并不明显, 存在两曲线部分接近重合的状态, 其目标函数之间差距约为0.45%, 表明IDEA对于普通车辆的出行需求较为敏感, 侧面反映了考虑普通车辆出行需求的重要性.

5 结论

1) 本文在未来自动驾驶与人工驾驶混行背景下, 基于自动卡车专用道对普通车辆出行路径选择的影响分析, 构建了一个新的双层规划模型以表示自动卡车专用网络布局方案和普通车辆出行路径选择结果之间的动态相互影响关系, 对自动卡车专用运输网络优化设计问题进行了研究.

2) 针对自动卡车专用运输网络设计问题的特征, 设计了一个基于实数编码的IDEA对模型进行求解, 具体包括考虑问题特性的预处理策略、高效的实数编码规则以及自适应交叉算子和缩放因子, 不仅保证了了解的可行性, 同时还避免了复杂的不可行解修复过程以及算法的早熟收敛.

3) 以Sioux Falls为基准算例, 分别在文中3种场景的交通网络状态进行优化结果对比. 结果表明, 建立的双层规划模型能够得到较优的自动卡车专用网络布局方案, 有效减小自动卡车专用道对交通系统的影响, 改善了系统运行效率. 而且专用道设置并不会绝对增加系统影响, 在某些关键路段设置自动卡车专用道还能够改善交通网络效率, 达到较好的效果.

4) 通过对不同规模的随机算例测试发现, 随着自动卡车任务的增加IDEA显著优于BDEA, 随着普通车辆出行需求的增加, IDEA与BDEA差距相对较小. 表明IDEA能够更好地解决运输任务较多的自动卡车专用道设计问题, 为大规模网络的专用道设计问题提供了一定的理论参考.

5) 本文对于普通车辆出行路径选择行为的描述是基于静态交通分配原理. 在未来的研究中可以进一步以动态的方式描述普通车辆的出行路径选择, 以便更加准确地衡量专用道的影响以及设置效果.

参考文献(References)

- [1] 郭戈, 许阳光, 徐涛, 等. 网联共享车路协同智能交通系统综述[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2375-2389. (Guo G, Xu Y G, Xu T, et al. A survey of connected shared vehicle-road cooperative intelligent transportation systems[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2375-2389.)
- [2] 田野. 干线物流: 进击的高速自动驾驶卡车[J]. 智能网联汽车, 2021(5): 29-31. (Tian Y. Trunk logistics: aggressive high-speed autonomous trucks [J]. Intelligent Connected Vehicles, 2021(5): 29-31.)
- [3] Roldan S, Jallais C, Hoedemaeker M, et al. Preparing for safe and successful truck platooning on public roads: Collaboration between the United States and the European Union[J]. Institute of Transportation Engineers, 2021, 91(11): 35-40.
- [4] 姚志洪, 顾秋凡, 徐桃让, 等. 考虑时延的智能网联汽车混合交通流稳定性分析[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1505-1512. (Yao Z H, Gu Q F, Xu T R, et al. Stability of mixed traffic flow with intelligent connected vehicles considering time delay[J]. Control and Decision, 2022, 37(6): 1505-1512.)
- [5] Zhao J, Zhou X Z. Improving the operational efficiency of buses with dynamic use of exclusive bus lane at isolated intersections[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(2): 642-653.
- [6] Han L S, Wu P, Chu C B. Service-oriented distributionally robust lane reservation[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 25: 100302.
- [7] 李福清, 伍乃骥. 运送任务合并下专用道设置问题的建模与求解[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1599-1606. (Li F Q, Wu N Q. Modeling and solution of lane reservation problem with transportation task merging[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(6): 1599-1606.)
- [8] Wu P, Chu F, Che A D, et al. Dual-objective optimization for lane reservation with residual capacity and budget constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(6): 2187-2197.
- [9] 张圣忠, 余永骏. 基于双层规划的危险品运输专用车道优化设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 61-66. (Zhang S Z, Yu Y Q. Optimal design of reserved

lanes for dangerous goods transportation based on bi-level programming[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(1): 61-66.)

[10] Sun X, Miwa T, Morikawa T. The impact of automated truck lanes on intercity expressways: A study using hybrid simulator[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(3): 32-42.

[11] Fang Y F, Chu F, Mammari S, et al. An optimal algorithm for automated truck freight transportation via lane reservation strategy[J]. *Transportation Research—Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 170-183.

[12] Wu P, Chu F, Che A D, et al. An efficient two-phase exact algorithm for the automated truck freight transportation problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 110: 59-66.

[13] Bureau of Public Roads. *Traffic assignment manual*[M]. Washington DC: Urban Planning Division, US Department of Commerce, 1964.

[14] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1952, 1(3): 325-362.

[15] Hansen P, Jaumard B, Savard G. New branch-and-bound rules for linear bi-level programming[J]. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1992, 13(5): 1194-1217.

[16] 黄海军. 城市交通网络平衡分析: 理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
(Huang H J. *Urban transportation network equilibrium analysis: Theory and practice*[M]. Beijing: China Communications Press, 1994.)

[17] Yen J Y. Finding the k shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712-716.

[18] 颜学峰, 余娟, 钱锋, 等. 基于改进差分进化算法的超临界水氧化动力学参数估计[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2006, 32(1): 94-97.
(Yan X F, Yu J, Qian F, et al. Kinetic parameter estimation of oxidation in supercritical water based on modified differential evolution[J]. *Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2006, 32(1): 94-97.)

作者简介

吴鹏(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 从事运筹与优化管理、智能交通管理等研究, E-mail: wupeng88857@126.com;

颜宝卿(1998—), 女, 硕士生, 从事运筹与优化管理、专用道设置规划的研究, E-mail: baoqing_yan@163.com.

下 期 要 目

计算机博弈中序贯不完美信息博弈求解研究进展 罗俊仁, 等

不确定性信息表示及推理 王 杰, 等

基于围攻机制的改进鲸鱼优化算法 王延峰, 等

一种具有情感和记忆机制的迷宫机器人认知模型 张晓平, 等

基于模拟退火机制的自适应粘性粒子群算法 孙一凡, 等

基于信-能复合调制的多母线直流微电网电流边缘控制策略 王 睿, 等

一种DDMCN火焰图像特征提取的转炉炼钢碳含量实时预测方法 刘旭琛, 等

基于指标选择和密度评估删除的高维多目标进化算法 张 伟, 等

基于混合搜索方向的前向复值神经网络的学习算法 黄 鹤, 等

轻度认知障碍的BOLD信号MEMD降噪处理 汪 瀚, 等

基于项集归减的高维频繁高效用项集挖掘多目标优化方法 张 磊, 等

一种改进 ϵ 约束飞蛾火焰优化算法及其在约束优化问题中的应用 叶文静, 等

基于点云采样权重估计的未知物体抓取位姿生成方法 蔡子豪, 等

基于RGB-D融合的密集遮挡抓取检测 李 明, 等

基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制 孙训红, 等