

基于地铁开展城市配送的选点-路径问题

周芳汀^{1†}, 周国华², 张 锦^{1,3}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 经济管理学院, 成都 610031;
3. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 610031)

摘要: 为实现低碳高效的运输服务, 着眼整合城市客货短途运输系统, 将地铁作为城市配送的骨干网络, 提出基于地铁配送的选点-路径问题. 从货物平均送达时间最小化角度出发, 整体优化配送中心的选择、地铁出站点的选择和离开站点后的配送路径, 设计改进递归粒度算法进行求解. 以成都市地铁网络为例, 验证模型和算法的实用性及有效性. 结果表明, 基于地铁开展城市配送, 能够保证货物精准送达客户手中, 且服务范围扩大不会显著影响货物送达时间, 能够满足货物送达稳定性.

关键词: 地铁; 城市配送; 选点-路径问题; 转运点; 改进递归粒度算法

中图分类号: U121; TP183 **文献标志码:** A

Point-routing problem of urban distribution based on subway

ZHOU Fang-ting^{1†}, ZHOU Guo-hua², ZHANG Jin^{1,3}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To achieve the low-carbon and efficient transportation service, focusing on integrating the urban short-distance transport systems for the passenger and freight, a point-routing problem taking subway as the backbone networks of urban distribution is proposed. From the perspective of minimizing delivery time of goods, the selection decisions of distribution centers, subway exit stations and after-exit distribution routes are optimized systematically. Then an improved recursive granular algorithm is designed for solving the problem. The practicality and effectivity of the model and algorithm are tested taking the Chengdu subway as a case. The result shows that the urban distribution system based on subway can ensure the freight delivering to customers precisely and promptly. Also the system has the high stability, since the delivery time of freight will not increase significantly with the expansion of the service range.

Keywords: subway; urban distribution; point-routing problem; transit point; improved recursive granular algorithm

0 引言

随着城市规模的扩张, 客货运输已成为影响城市发展效率和质量的瓶颈. 目前, 城市内部的短途客运、货运系统是相分离的, 货运无法像客运那样拥有专用的通道和无缝衔接的枢纽, 导致配送效率低下, 而人们对货物送达时间的要求却越来越高. 因此, 企业不断推出精确、快速的送货服务, 如京东推出了“京准达”服务, 客户能够在精确的时间段内收取货物; 苏宁推出了“急速达”服务, 能够在两小时内将货物送达客户手中. 客运公共基础设施通常由政府负责修建和运营, 而货物配送则由私营企业完成, 将客货运

整合为统一的物流系统, 使用短途公共交通系统运输货物, 是未来的趋势^[1-2]. Nash^[3]最早提出了使用公共交通工具运送货物的概念. Trentini等^[4]提出旅客、货物共同使用交通资源, 共享道路容量、公共交通服务及基础设施, 包括共享公共汽车、地铁、电车; 共享多用途车道、货车车道; 共享配送站、停车场货物柜、地铁站储物柜等^[5]. Masson等^[6]在法国拉罗谢尔调查了货物配送系统, 提出共享旅客和货物的交通资源, 整合短途运输系统, 以增加公共交通利用率. 城市区域密集的公共交通线路根据预先设定的路线和时间表运行. 这里将长期使用、路线不变的公共交通线

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71403225).

责任编委: 樊治平.

作者简介: 周芳汀(1993—), 女, 博士生, 从事轨道交通系统规划、城市物流配送的研究; 周国华(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事轨道交通建设管理、物流系统优化等研究.

[†]通讯作者. E-mail: fangtingzhou@my.swjtu.edu.cn

路称为预定线路. 起初, 预定线路与预约叫车服务整合, 多为残疾人和老年人服务^[7], 后也为满足乘客门到门的需求服务^[8]. 若将货物运输与预定线路服务整合, 可以潜在降低物流服务商运营成本, 同时使公共交通部门得到额外的收入^[9].

地铁作为公共交通工具的重要组成部分, 呈现了四通八达的趋势, 有准时、高效、高频的特点, 其站点选址是基于人口密度分布的商住中心, 货物根据居民和商户的需求配送. 因此, 货物配送集中点与地铁站点选址的考虑是相吻合的. 若利用地铁的闲置空间装载货物运入城市中心, 则可最大化提高公共交通基础设施利用率的同时, 减少货车的需求量. 相比传统物流, 基于地铁的货物运输具有准点率高、速度快的特点, 且能够在一定程度上减少单纯利用货车运输货物导致的交通拥堵、空气和噪声污染等问题. 在交通物流融合的大趋势下, 本文以整合短途客货运系统为基础, 地铁作为可同时载客和装载小型包裹的多用车厢, 用地铁的闲置运能载货, 共享地铁设施, 提高其利用率, 确保客流和货流的高效运输.

已有文献对城市地铁发展物流业务进行了实证研究, Kikuta等^[10]将札幌市的地铁系统与传统的卡车运输系统整合, 使郊区和市中心之间货物配送更加顺畅. Dampier等^[11]研究了泰恩-威尔地铁系统直接运送货物到城市中心的可行性及其潜在问题. 此外, Masson等^[6]研究了整合客运和货运系统背景下的混合城市交通问题, 使用公交车将货物从中央配送中心运送到转运点, 再用三轮车将货物从转运点运送至目的地. Fatnassi等^[12]研究了整合个人快速交通与货运快速交通模式(PRT-FRT), 共享快速公交网络. Masson等^[13]提出了用分支剪切价格算法解决有班车路线的集送货问题. Ghilas等^[14]研究了考虑时间窗有固定预定线路的集送货问题(FSL-PDP), 用大规模邻域搜索算法进行求解, 后又将随机需求考虑进去, 提出在一个随机环境下整合短途运输的解决方案^[9].

虽然, 已有文献针对基于公共交通的城市配送问题进行了研究, 但研究对象仅限于单条公共交通线路, 没有考虑预定线路内部的优化; 同时研究问题仅限于有转运或集送货的车辆路径问题, 没有考虑转运点的选择; 最后研究目标仅限于从配送企业的角度考虑总成本最小化, 没有考虑从客户的角度优化整个配送系统. 本文以地铁网络为研究对象, 不只考虑一条线路, 而是着眼于整个地铁网络, 转运点不是固定的某一个或几个, 而是将所有的地铁中转站作为

备选转运点(即为可开放转运点, 其中开放给货物转运的称为开放转运点); 不仅限于研究离开转运点后的路径优化, 也没有运用传统分区配送模式^[15], 而是将配送中心选择、转运点选择和配送路径进行整体优化; 同时, 从客户收货时间的角度出发, 以平均货物送达时间最小化作为目标. 在此基础上, 整合地铁网络和传统末端配送, 提出基于地铁开展城市配送的选点-路径问题, 以确定物流配送中心、地铁转运点的位置、数量和节点间的线路安排.

1 模型构建

1.1 问题描述

基于地铁开展城市配送的选点-路径问题可描述如下: 由若干条地铁线路形成的地铁网络中, 有多个临近地铁站点的配送中心和多个地铁中转站, 货物从临近地铁站点的配送中心通过地铁网络运送到城市中心的转运点, 再从转运点通过城市电动货车运送到客户手中. 因此, 在由大量备选配送中心、备选转运点和客户构成的配送网络中, 需要确定开放哪些配送中心和转运点, 设计转运点到客户点的车辆行驶路径, 使货物平均送达时间最小, 如图1所示. 图1中, 开放即为选中, 关闭即为未选中.

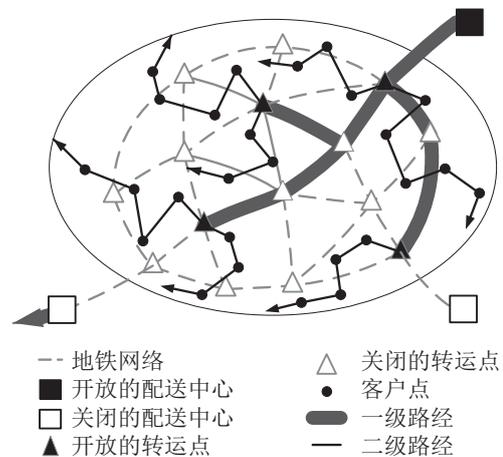


图1 基于地铁配送的选点-路径问题示例

1.2 假设条件

基本假设如下:

- 1) 每个客户被访问且仅被访问一次, 每个开放的转运点被访问且仅被访问一次;
- 2) 每个客户分配且仅分配给一个开放的转运点, 每个开放的转运点分配且仅分配给一个开放的配送中心;
- 3) 二级电动货车的装载量不能超过其容量;
- 4) 开放的配送中心、转运点数量不能超过预定数;

5) 每个转运点的货物量等于分配给其的所有客户需求量之和;

6) 任意两个转运点之间无二级路径相连;

7) 一级路径不需要返回配送中心, 二级路径不需要返回转运点, 一级、二级路径均是开放的;

8) 二级路径车辆行驶时间与行驶距离成正比。

基于地铁开展城市配送服务补充假设如下:

1) 地铁线路运输货物的能力不会影响客运服务质量;

2) 每个转运点可被用于暂存和转运货物;

3) 地铁线路站间行驶时间固定, 且换线时间固定;

4) 客户需求的相关数据预先已知。

1.3 模型参数

1) 模型参数集合。

V_D 、 V_S 、 V_C 分别为备选配送中心、备选转运点、客户的集合, $V = V_D \cup V_S \cup V_C$, $V_1 = V_D \cup V_S$ 为一级配送系统中节点的集合, $V_2 = V_S \cup V_C$ 为二级配送系统中节点的集合, V_R 为一级配送系统所使用的地铁线路集合, V_V 为二级配送系统所使用的电动货车集合, $V_K = V_R \cup V_V$ 。

参数 N_D 、 N_S 分别为备选配送中心、备选转运点数量, N_d 、 N_g 分别为可开放的配送中心和转运点数量, N_c 为客户的数量, N_r 为地铁条数, N_v 为电动货车数量; Q_V 为二级配送系统中电动货车的容量限制; d_j 为客户 j 的需求量, c_{ij} 为配送系统中节点 i 与 j 之间车辆的行驶时间; M 为一个大的正整数; fw 为服务范围; 变量 t_i^r 表示客户 i 由地铁 r 提供服务所花费的时间, t_i^v 表示客户 i 由电动货车 v 提供服务所花费的时间。

2) 决策变量。

x_{ij}^v 二级配送系统中从节点 i 行驶到 j 由电动货车 v 提供服务时, 取值为 1, 否则为 0; y_{ij}^r 一级配送系统中从节点 i 行驶到 j 由地铁 r 提供服务取值为 1, 否则为 0; m_{gj} 为客户 j 的货物来自于转运点 g 取值为 1, 否则为 0; n_{dg} 为转运点 g 的货物来自于配送中心 d 取值为 1, 否则为 0; o_g 为转运点 g 开放取值为 1, 否则为 0; p_d 为配送中心 d 开放取值为 1, 否则为 0。

1.4 模型建立

$$\min \left(\sum_{r \in V_R} \sum_{i \in V_S} t_i^r + \sum_{v \in V_V} \sum_{i \in V_C} t_i^v \right) / N_c. \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in V_2} x_{ij}^v = \sum_{j \in V_2} x_{ji}^v, \quad \forall i \in V_2, v \in V_V; \quad (2)$$

$$\sum_{v \in V_V} \sum_{j \in V_2, i \neq j} x_{ij}^v = 1, \quad \forall i \in V_C; \quad (3)$$

$$\sum_{g \in V_S} m_{gj} = 1, \quad \forall j \in V_C; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_C} x_{ij}^v d_j \leq Q_V, \quad \forall v \in V_V; \quad (5)$$

$$\sum_{g \in V_S} \sum_{j \in V_C} x_{gj}^v = 1, \quad \forall v \in V_V; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V_C} x_{gi}^v + \sum_{i \in V_2 \setminus \{i\}} x_{ij}^v \leq 1 + m_{gj}, \quad \forall j \in V_C, g \in V_S, v \in V_V; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V_C} m_{gj} \leq M o_g, \quad \forall g \in V_S; \quad (8)$$

$$\sum_{g \in V_S} o_g \leq N_g; \quad (9)$$

$$t_i^v + c_{ij} - (1 - x_{ij}^v)M \leq t_j^v, \quad \forall i \in V_2, \forall j \in V_C, \quad \forall i \neq j, \forall v \in V_V; \quad (10)$$

$$\sum_{d \in V_D} x_{dg}^r \leq o_g, \quad \forall r \in V_R, \forall g \in V_S; \quad (11)$$

$$\sum_{g \in V_S} n_{dg} \leq M p_d, \quad \forall d \in V_D; \quad (12)$$

$$\sum_{d \in V_D} p_d \leq N_d; \quad (13)$$

$$\sum_{d \in V_D} n_{dg} \leq o_g, \quad \forall g \in V_S; \quad (14)$$

$$t_i^r + c_{ij} - (1 - y_{ij}^r)M \leq t_j^r, \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_S, \quad \forall i \neq j, \forall r \in V_R; \quad (15)$$

$$t_i^v \geq 0, \quad \forall i \in V_S, \forall v \in V_V; \quad (16)$$

$$t_i^r \geq 0, \quad \forall i \in V_S, \forall r \in V_R; \quad (17)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V_2, v \in V_V; \quad (18)$$

$$y_{ij}^r \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V_1, j \in V_S, r \in V_R; \quad (19)$$

$$m_{gj} \in \{0, 1\}, \quad \forall g \in V_S, j \in V_C; \quad (20)$$

$$n_{dg} \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in V_D, g \in V_S; \quad (21)$$

$$o_g \in \{0, 1\}, \quad \forall g \in V_S; \quad (22)$$

$$p_d \in \{0, 1\}, \quad \forall d \in V_D. \quad (23)$$

其中: 式(1)为目标函数, 括号内第一部分是所有货物在一级路径上所花费时间之和, 第二部分是所有货物在二级路径上所花费时间总和, 两部分加起来即为所有货物在配送时多花费的时间, 整体表示最小化货物平均送达时间, 一级路径所花费时间与其所选配送中心及转运点有关, 二级路径所花费时间则与电动货车载货量、行驶路径有关; 式(2)和(3)表示路径流量守恒, $v \in V_V$ 且 $|V_V| = N_v$, 电动货车数不超过 N_v ; 式(4)表示一个客户的货物只能来自于一个转运点; 式(5)

为电动货车容量限制;式(6)表示确保每个客户被分配到一条路径,且每条路径从一个转运点出发;式(7)表示如果客户 j 与转运点 g 相连,则客户被分配到转运点 $m_{gj} = 1$;式(6)和(7)表示电动货车与转运点的关系,决定每个车辆被分配的转运点;式(8)表示若客户被分配到某转运点,则需保证该转运点开放;式(9)为开放转运点的总数量限制;式(10)表示每个客户点在二级配送时所需等待时间;式(11)表示每个开放的转运点仅被装有货物的地铁访问一次,未开放的转运点,无地铁货物中转;式(12)表示若转运点被分配到某配送中心,则需保证该配送中心开放;式(13)为开放配送中心的总数量限制;式(14)表示一个转运点的货物只能来自于一个配送中心;式(15)表示每个转运点在一级配送时所需等待时间;式(16)~(23)表示变量的范围和类型.

2 算法设计

本文采用逆向求解方法研究基于地铁配送的选点-路径问题,在二级配送系统中选定转运点的位置,确定城市电动货车路径;一级则选定配送中心的位置,并得到相应的地铁载货分配.递归粒度算法(Recursive granular algorithm)是基于个体的搜索算法,运用搜索算子探索解空间.粒度的概念用于有效地减少邻域搜索,去除不必要和不会改进的步骤^[16].递归粒度算法曾被用于求解延迟选址-路径问题(Latency location-routing problem)^[17],该问题与基于地铁配送的选点-路径问题相似,因此在此基础上,本文增加了路径重连、路径拆分和设施调整3部分,改进了局部搜索的过程,使其适应于求解基于地铁配送的选点-路径问题.

2.1 算法设计要素

1) 编码.

基于地铁配送的选点-路径问题的解包括3部分,采取定长编码方式,由自然数和字母组成.先定义开放的配送中心,再定义开放的转运点,最后安排电动货车路径.客户从1到 N_c ,每个 V 代表路径终止,从相同转运点开始另一路径(相同配送中心);每个 S 代表终止当前转运点的路径分配,从一个新的转运点开始一个新的路径(相同配送中心);每个 D 代表终止当前配送中心的路径分配,且终止当前转运点的路径分配,从一个新的转运点开始一个新的路径.各部分编码长度分别为 N_d 、 N_g 、 $N_c + N_v - 1$,总长度为 $N_d + N_g + N_c + N_v - 1$.

2) 初始化种群.

设种群规模为 N ,随机产生初始种群. Moshref-

Javadi等^[17]提出了贪婪法(Greedy method)、中心性法(Centrality method)、亚晶粒生长法(Subgrain growth)等生成初始解的启发式方法.综合考虑种群的质量和多样性,本文以中心性方法为基础,将电动货车分配方式改为平均分配,同时增加了一级配送网络的配送中心选择及地铁载货分配部分.共识算法的思想是打开所有备选设施,如果一条路径的两端至少有一端离某设施最近,则该设施接收一票,最后开放票数前几位的设施点,这里用共识算法选择配送中心的位置.

初始解生成方法:使用复杂网络中心性方法打开转运点,并将电动货车平均分配给开放的转运点,转运点 g 分配到 $AV_g = \left\lceil \frac{N_v}{N_g} \right\rceil$ 辆车($\lceil x \rceil$ 表示大于 x 的最小整数).利用 $cent_g = \sum_{i \in V_C} \frac{1}{1 + c_{gi}}$ ($\forall g \in V_S$)计算每个转运点的中心值,使用轮盘方法打开下一个转运点,中心值高的转运点有更大的机会被打开,中心值低的转运点仍有机会被选中,通过开放不同转运点增加初始种群的多样化.电动货车分配在每次迭代中是动态的,在完成电动货车分配后,保证电动货车容量的条件下,用最小距离法生成路径,使所有解可行.由于地铁的每站行驶时间是固定的,将每个配送中心到各个转运点的最短时间所对应的路径确定为配送中心到转运点的固定线路.利用共识算法对配送中心进行投票,从而确定开放的配送中心,计算每个开放的转运点被分配的客户需求量之和作为该转运点在一级配送网络中的货物量(即地铁载货分配量).将一级和二级配送网络中所有客户的等待时间加总,求均值得到货物平均送达时间.

3) 适应度函数计算.

目标函数值用货物平均送达时间表示,求解过程中允许不可行解的存在,即电动货车载重超过最大容量限制,因此适应度函数需要对超出最大容量限制的部分作出惩罚. F 为适应度值, O 为目标函数值, P 为惩罚系数, Ex 为总过量负载, $F = O + P \times Ex$,适应度函数值越小越优.

4) 选择操作.

采用轮盘赌选择和精英保留相结合的选择策略.

5) 粒度搜索操作.

首先定义每个客户的邻域,并存储所有相邻客户.对于预定数量的客户(N_{ng}),如果客户与其相邻客户(随机选择一个)在不同的路径中,则将客户移动到相邻客户之后^[16].如果这个移动改善了适应度值,则算法接受移动,若解可行,则当前解被更新.

6) 路径重连操作.

路径重连可保留最优解的部分路径,其他路径用当前解补齐,去掉重复的客户,用最小插入法依次将缺失的客户插入解中,形成新的解.

7) 路径拆分操作.

当路径数量小于电动货车数目,即有剩余电动货车可利用时,可将货物送达时间最长的客户所在的路径拆分成两条路径,从而减少货物的送达时间.

8) 设施调整操作.

根据概率改变开放转运点和配送中心,将原本开放的某配送中心(或转运点)关闭,再将原本关闭的某配送中心(或转运点)开放,得到新的选择方案.

9) 局部搜索操作.

在改变搜索邻域后,局部搜索操作被应用于邻域中的局部改善,包括路径间和路径内的交换、重定位和2-Opt共6个算子,局部搜索操作根据各自的概率在解的所有路径上应用局部搜索 N_{locg} 次.

2.2 算法求解步骤

Step 1: 初始化种群规模 N 、最大迭代次数 N_{Itrg} 、局部搜索次数 N_{locg} 、预定数量的客户 N_{ng} 、路径重连概率 P_{cl} 、设施调整概率 P_{ad} 、惩罚系数 P .

Step 2: 生成 N 个初始解,并计算初始解适应度值,得到最优解及最优适应度值.

Step 3: 对 N_{ng} 个预定数量客户进行粒度搜索.

Step 4: 将当前解与当前最优解路径重连形成新解.

Step 5: 若存在多余电动货车,则执行路径拆分,否则,转至Step 6.

Step 6: 按照设施调整概率 P_{ad} ,改变配送中心和转运点的开放状态.

Step 7: 按照概率选择局部搜索算子,应用 N_{locg} 次.

Step 8: 计算适应度值,按照精英保留策略和轮盘赌的方式对子代进行选择,若当前迭代次数小于最大迭代次数,则转至Step 3,否则转至Step 9.

Step 9: 生成最优解,得到最优适应度值及其相应最优解.

3 实例分析

3.1 数据选取

以成都市地铁网络货物运输为例,如图2所示.城市路网由内而外依次是一、二、三环及绕城,地铁网络有7条线路,24个中转运站,目前已开通运营1~4号线,1、3、4号线的延长线和5~7号线正在建设中.正方形虚线从内到外分别表示 36 km^2 、 64 km^2 、

100 km^2 和 256 km^2 的服务区域.选取临近地铁线路的龙泉、新都、双流3个物流配送中心作为备选配送中心,客户点均匀分布在服务区域内.

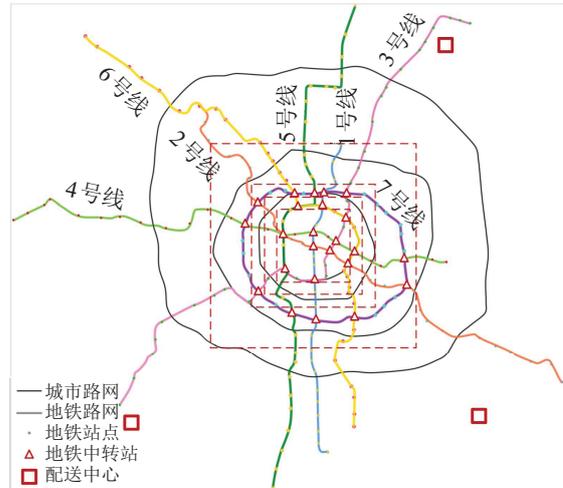


图2 成都市路网及地铁1-7号线路网示意图

龙泉、新都、双流配送中心装运时间分别为11.5 min、6.2 min和9.3 min,一级路径行驶时间由换线时间和运输时间两部分组成.通过地铁中转运站从一条地铁线路换到另一条需花费的时间为5 min.已建成运营的线路采用实际运行时间.根据已开通线路站点间的距离和运行时间,推算正在建设线路的运行时间,小于等于0.8 km的运行时间为1 min,大于0.8 km小于1.4 km的为2 min,大于等于1.4 km的为3 min.

配送中心到备选转运点的最少时间如表1(单位min)所示.考虑1~4号线(6个转运点)与1~7号线(24个转运点)两种不同规模与密度的地铁网络,虽然部分转运点重合,但由于地铁线路的增加,网络密度加大,站点间的最短行驶路径会发生变化,配送中心到转运点的最少时间有所不同.二级配送中城市电动货车的平均配送速度按照15 km/h计算.

3.2 模型求解

参数设置:初始种群规模 $N = 20$,最大迭代次数 $N_{Itrg} = 300$ 、局部搜索次数 $N_{locg} = 10$ 、预定数量的客户 $N_{ng} = 5$;路径重连概率 $P_{cl} = 0.7$;设施调整概率 $P_{ad} = 0.6$;惩罚系数 $P = 100$.

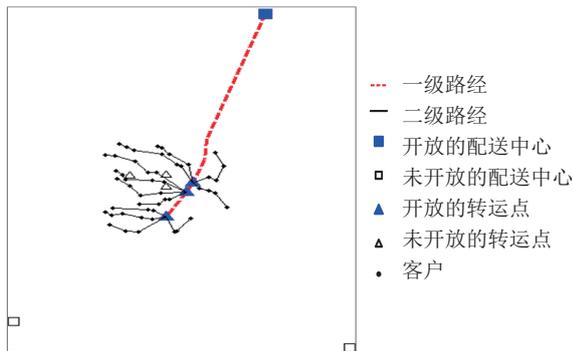
1) 地铁线路 $N_R = 4$ 、地铁中转运站 $N_S = 6$.

备选配送中心 $N_D = 3$,开放配送中心 $N_d = 1$,备选转运点 $N_S = 6$,开放转运点 $N_g = 3$,电动货车 $N_v = 12$,客户点 $N_c = 50$,服务范围 64 km^2 ($8\text{ km} \times 8\text{ km}$).采用仿真计算,使用Matlab 2011编程实现,依据基础数据得到在 64 km^2 的范围内,货物平均送达时间仅45.3 min,地铁路径花费时间占比超70%,最优

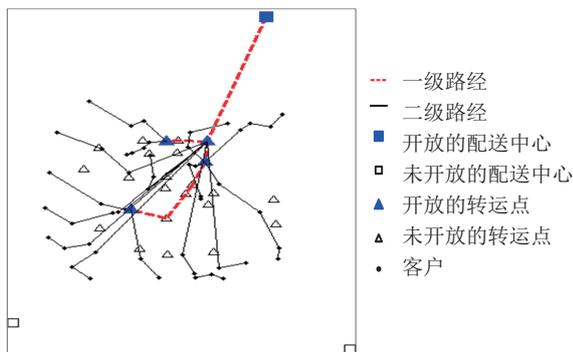
表1 配送中心到备选转运点的最少时间

		驷马市	天府广场	省体育馆	中医大省医院	春熙路	市二医院			
4条地铁线 路、6个备 选转运点	龙泉配送中心	46.5	39.5	47.5	45.5	36.5	43.5			
	新都配送中心	39.2	39.2	38.2	44.2	32.2	30.2			
	双流配送中心	44.3	42.3	31.3	51.3	37.3	39.3			
		驷马市	天府广场	省体育馆	中医大省医院	春熙路	市二医院	高升桥	西北桥	
		龙泉配送中心	46.5	39.5	47.5	45.5	36.5	43.5	52.5	52.5
		新都配送中心	39.2	39.2	38.2	44.2	32.2	30.2	43.2	38.2
		双流配送中心	44.3	42.3	31.3	35.3	37.3	39.3	26.3	40.3
		人民北路	前锋路	玉双路	牛王庙	太平园	文化宫	一品天下	西南交大	
7条地铁线 路、24个备 选转运点	龙泉配送中心	49.5	45.5	39.5	32.5	51.5	55.5	51.5	53.5	
	新都配送中心	35.2	26.2	37.2	39.2	47.2	42.2	39.2	34.2	
	双流配送中心	48.3	43.3	46.3	46.3	22.3	36.3	39.3	44.3	
		北站西二站	火车北站	驷马桥	槐树店	成都东站	琉璃场	火车南站	神仙树	
		龙泉配送中心	50.5	49.5	46.5	32.5	23.5	37.5	42.5	45.5
		新都配送中心	31.2	30.2	22.2	41.2	45.2	46.2	48.2	56.2
		双流配送中心	43.3	49.3	47.3	54.3	50.3	41.3	36.3	33.3

解选择开放新都配送中心及省体育馆、春熙路、市二医院3个转运点,如图3(a)所示。



(a) $N_R = 4, N_S = 6$



(b) $N_R = 7, N_S = 24$

图3 成都市路网及地铁1~7号线路网

货物送达时间的客户数量基本服从正态分布,货物在35~55 min之间送达的客户占90%,所有货物均可在半小时~1小时之间从城市绕城外的配送中心送达二环(64 km²)内的客户手中。

2) 地铁线路 $N_R = 7$ 、地铁中转站点 $N_S = 24$ 。

备选配送中心 $N_D = 3$, 开放配送中心 $N_d = 1$, 备选转运点 $N_S = 24$, 开放转运点 $N_g = 4$, 电动货车 $N_v = 15$, 客户点 $N_c = 50$, 服务范围 256 km² (16 km × 16 km)。同样采用仿真计算,使用Matlab 2011编程实现,依据基础数据得到在256 km²的范围内,货物平均送达时间仅44.8 min,地铁路径花费时间占比超50%,较服务范围64 km²时低一些,最优解选择开放新都配送中心及前锋路、驷马桥、高升桥、北站西二站4个转运点,如图3(b)所示。

客户分布在256 km²范围(约三环)内,货物在一小时以内送达的占92%,比服务64 km²范围减少了8%。可见,扩大服务范围的同时,可通过增加转运点和电动货车数目,保证配送服务的效率。

3.3 敏感性分析

固定配送中心备选个数 N_D 、开放个数 N_d 、客户点数 N_c ,将备选转运点数 N_S 、开放转运点数 N_g 、电动货车数 N_v 、服务范围 fw 作为敏感性参数,分析基于地铁配送的选点-路径问题。

1) N_S 、 N_g 和 N_v 敏感性分析。

客户分布在64 km² (8 km × 8 km) 的范围,备选转运点个数为6和24时,分别改变开放转运点个数 $N_g = [2, 3, 4]$ 、电动货车数目 $N_v = [11, 12, 13, 14, 15]$,重复运行10次得到的最好解如图4所示,配送中心和转运点选择结果如表2所示。

如图4(a)所示,当有6个备选转运点时,开放2个

表2 配送中心和转运点选择结果

备选转运点个数	开放转运点个数	配送中心	转运点	地铁线路
6	2	新都	市二医院、春熙路	3
	3	新都	市二医院、春熙路、省体育馆	3
	4	新都	市二医院、春熙路、省体育馆、中医大省医院	3、4
24	2	双流	高升桥、市二医院	3
			高升桥、春熙路	3
	3	双流	太平园、高升桥、中医大省医院	3、5
			太平园、高升桥、省体育馆	3
	4	新都	驷马桥、前锋路、高升桥、市二医院	3
4	双流	太平园、高升桥、前锋路、中医大省医院	3、5	

或3个转运点,或改变电动货车数目,对货物平均送达时间影响不大,而开放转运点数为4个时,对货物平均送达时间的减少有一定敏感性.如图4(b)所示,当有24个备选转运点,改变开放转运点数到4个时,会较为显著地影响货物平均送达时间,电动货车数15个时,货物平均送达时间仅为34.8 min.此外,随着地铁线路的密集,备选转运点数目的增加,平均送达时间会显著降低.

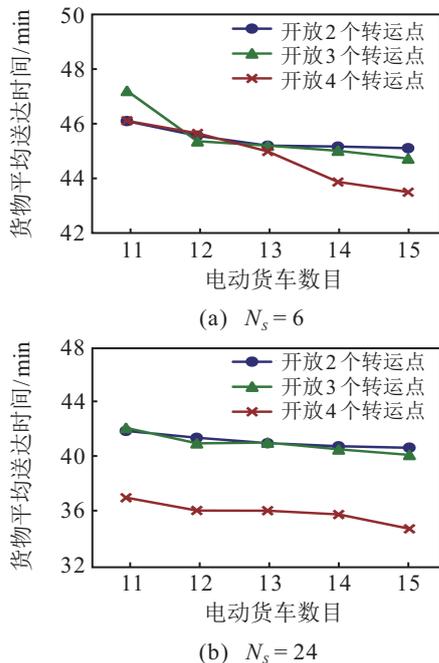


图4 开放转运点数 N_g 和电动货车数 N_v 敏感性分析

如表2所示,在两种密度的地铁网络中进行配送中心和转运点选择,离配送中心最近的备选转运点一定会被选中,配送中心所在地铁线路上的备选转运点有较大机会被选中,结论与实际相符.

2) fw 和 N_v 敏感性分析.

当从24个备选转运点 N_S 中选取4个开放时,改变服务范围 $fw = (6\text{ km} \times 6\text{ km}), (8\text{ km} \times 8\text{ km}), (10\text{ km} \times$

$10\text{ km}), (16\text{ km} \times 16\text{ km})$. 电动货车数目 $N_v = [11, 12, 13, 14, 15]$. 重复运行10次得到的最好解如图5所示.

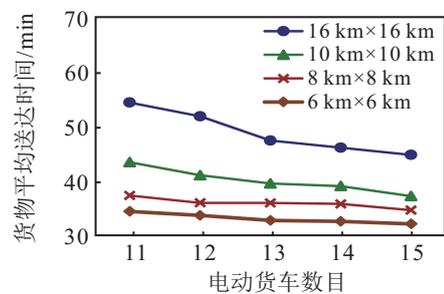


图5 服务范围 fw 和电动货车数 N_v 敏感性分析

当服务范围较大时,电动货车数量增多,货物平均送达时间减少较多;当电动货车数 $N_v = 13$ 时,再增加电动货车数目,货物平均送达时间改变较小.此外,货物平均送达时间随服务范围的增大而增加,客户服务范围从 36 km^2 增加到 100 km^2 , 服务范围面积增加了近3倍,但货物平均送达时间仅增加了5 min左右;客户服务范围从 36 km^2 增加到 256 km^2 , 服务范围面积增加了7倍多,货物平均送达时间增加了12 min左右.

可见,基于地铁网络运货的整个物流系统对服务范围大小并不敏感,说明大城市应用地铁为城市配送一级网络能有效缩短配送时间,且较为稳定.

4 结论

利用地铁配送货物是一种提高资源利用率、减少地面交通拥堵的方式,但需在站台内设置专用物流区域,每节车厢后部设置货物存放区域,并布置卡扣,将货物装至手推车、带轮货箱等即可实现货物快速装卸,在需要运输货物时,可关闭隔仓,与乘客分离,技术上的措施可以在实现快速装卸货的同时,有效减少货运对客运的影响.

我国城市拥堵情况日益严重,采取措施分担地面

道路流量具有十分显著的意义. 充分利用地铁系统, 共享城市地铁网络运输货物, 将货物从地上转移到地下, 是减轻城市交通拥堵的有力保障, 更是一种共享经济的模式. 本文提出了基于地铁配送的选点-路径问题及优化模型, 设计并改进了递归粒度算法, 以成都市地铁网络为例, 考虑了2种密度的地铁网络和4种大小的客户服务范围, 采用Matlab 2011编程, 对模型进行了实例分析, 验证了算法有效性的同时, 还得到以下主要结论:

1) 当服务范围 64 km^2 时, 货物均可在1小时之内从城市周边的配送中心运送到客户手中, 印证了将地铁作为骨干配送网络, 可为物流企业如京东准备提供的“京准达”1小时配送服务提供有力的运输技术保障.

2) 服务范围扩大, 不会显著影响配送时间. 当服务范围面积增加近3或7倍时, 货物平均送达时间仅分别增加了5 min、12 min左右. 这也表明由于地铁有准时、高频的特性, 城市规模越大, 应用地铁开展城市配送越能实现送达稳定性.

3) 转运点选择时, 离配送中心最近的备选转运点会被选中, 配送中心所在地铁线路上的备选转运点有较大机会被选中, 这为将来城市配送中心的布局和选址提供了参考依据, 同时城市地铁客站在规划设计时也应充分考虑货物中转和暂存的功能.

参考文献(References)

- [1] European Commission. Towards a new culture for urban mobility[R]. Brussels: Directorate General for Energy and Transport, 2007.
- [2] Savelsbergh M, Van Woensel T. 50th anniversary invited article — City logistics: Challenges and opportunities[J]. *Transportation Science*, 2016, 50(2): 579-590.
- [3] Nash C A. Economics of public transport[M]. London: Longman Group UK Limited, 1982: 156-192.
- [4] Trentini A, Mahléné N. Toward a shared urban transport system ensuring passengers & goods cohabitation[J]. *Tema J of Land Use Mobility & Environment*, 2010, 3(2): 37-44.
- [5] Trentini A, Malhene N. Flow management of passengers and goods coexisting in the urban environment: conceptual and operational points of view[J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, 39: 807-817.
- [6] Masson R, Trentini A, Lehuédé F, et al. Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods[J]. *EURO J on Transportation and Logistics*, 2017, 6(1): 81-109.
- [7] Aldaihani M, Dessouky M M. Hybrid scheduling methods for paratransit operations[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2003, 45(1): 75-96.
- [8] Häll C H, Andersson H, Lundgren J T, et al. The integrated dial-a-ride problem[J]. *Public Transport*, 2009, 1(1): 39-54.
- [9] Ghilas V, Demir E, Woensel T V. A scenario-based planning for the pickup and delivery problem with time windows, scheduled lines and stochastic demands[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 91: 34-51.
- [10] Kikuta J, Ito T, Tomiyama I, et al. New subway-integrated city logistics system[J]. *Procedia-social and Behavioral Sciences*, 2012, 39: 476-489.
- [11] Dampier A, Marinov M. A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in newcastle upon tyne[J]. *Urban Rail Transit*, 2015, 1(3): 164-182.
- [12] Fatnassi E, Chaouachi J, Klibi W. Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 81: 440-460.
- [13] Masson R, Ropke S, Lehuédé F, et al. A branch-and-cut-and-price approach for the pickup and delivery problem with shuttle routes[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 236(3): 849-862.
- [14] Ghilas V, Demir E, Van Woensel T. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 72: 12-30.
- [15] 葛显龙, 许茂增, 王伟鑫. 基于联合配送的城市物流配送路径优化[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 503-512. (Ge X L, Xu M Z, Wang W X. Route optimization of urban logistics in joint distribution[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 503-512.)
- [16] Prins C, Prodhon C, Ruiz A, et al. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic[J]. *Transportation Science*, 2007, 41(4): 470-483.
- [17] Moshref-Javadi M, Lee S. The latency location-routing problem[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 255(2): 604-619.

(责任编辑: 郑晓蕾)