

# 城市轨道交通规划线网生成模型研究

柴树山 梁青槐 周宇 王恒

(北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:** 建立城市轨道交通线网规划阶段的线网定量化生成数学模型, 模型在考虑提高轨道交通客流分担竞争力的基础上, 以线网平均负荷强度最大为目标, 以线网拓扑关系、节点和区间重复度、线路条件、客流平衡、换乘条件、线网规模、舒适度水平为约束; 提出以城市主要客流走廊和客流集散点为基础的确线网搜索范围和搜索方向的策略, 合理把握线路的走向边界; 由于该问题属于 NP-Hard 问题, 对于大型网络搜索空间大, 难以求解, 文章基于模拟退火框架设计邻域搜索算法求解方法。以 X 市为例, 计算得到该市轨道交通远期规划线网各线路走向, 通过与 X 市既有规划线网的对比分析, 可以看出, 基于本模型生成的规划线网, 在满足主客流走廊和城市发展主轴方向的客流需求下, 具有规模小、线网利用率高的特点, 从而验证模型与算法的有效性。

**关键词:** 城市轨道交通; 线网规划; 线网生成; 邻域搜索; 模拟退火

**中图分类号:** U239.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)09-0121-08

## Research on generation model of urban rail transit planning network

Chai Shushan Liang Qinghui Zhou Yu Wang Heng

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A mathematical model for quantitative generation of urban rail transit planning network is established in this study. The model is developed in consideration of enhancing the competitiveness of passenger flow sharing for rail transit, targeting at maximizing the average load intensity of the network with the network topology, node and section repeatability, line conditions, passenger flow balance, transfer condition, network scale and comfort level as constraints. Based on the main passenger corridors and passenger distributing centers, a strategy for determining the search range and search direction of the network is proposed to limit the trend boundary of the alignments reasonably. The problem belongs to NP-Hard problem, which is difficult to be solved for the large-scale network due to its large search space. So, a neighborhood search algorithm is designed based on simulated annealing framework. With the X city taken as an example, the routes of the rail transit network in the long-term are calculated. Compared with the existing planned network of the city, the network generated based on the present model has smaller scale and higher utilization rate while meeting the passenger demand along the main passenger corridors and main axis of urban development, thus verifying the effectiveness of the model and the algorithm.

**Keywords:** urban rail transit; network planning; network generation; neighborhood search; simulated annealing

**E-mail:** sschai@foxmail.com

## 引 言

线网规划是城市轨道交通长远发展的总体设

计, 也是近期建设规划的重要依据, 几十年来, 随着城市轨道交通的发展, 国内逐渐形成了一套比较成熟的线网规划体系, 主要包括“点、线、面”多模块层次分析法、节点锚固编织法和功能层次法等。然而, 其主要以定性分析为主、主观性较大, 规划线网方案主要依赖规划者的理念、思想和经验, 很难获得量化的全局最优的线网方案。

随着网络科学理论、计算机技术等的发展,国内外许多学者开始探索线网的量化生成。在国内,杨京帅<sup>[1]</sup>对轨道交通线网的合理规模和布局规划进行了研究,利用主要集散点连线法、主要出行经路法、出行向量法等构建了城市轨道交通线网;罗小强<sup>[2]</sup>运用图论、最优化理论和复杂网络等方法对城市交通的线网规划方法进行研究,建立了轨道交通布局优化双层目标模型,但是缺乏系统的模型解算方法;何明<sup>[3]</sup>在交通需求特征和城市空间结构的基础上研究了初始线网生成技术,并从可靠性角度对线网方案进行了优化;杨明<sup>[4]</sup>对线网的不同层次分级和衔接方式、线网总体形态布局、线网方案的生成方法进行了研究。由于国内对这方面研究起步较晚,对于客流的量化影响、客流走廊和客流集散点的分布等考虑不足,往往局限于既有线路的改造、部分线路的走向优化等,缺乏规划线网定量生成的系统性方法。

国外对于线网方案量化生成的研究起步较早,早在 1970 年, Dicesare<sup>[5]</sup>在他的博士论文中研究了关于轨道交通选线定位的问题,在起讫点已知的情况下建立了以成本最小为目标的最优化模型;1979 年 Church 和 Clifford<sup>[6]</sup>提出对上述问题的简单解法; Garcia<sup>[7]</sup>在 2006 年基于图论建立以线网总客流吸引量最大为目标的数学模型,并加入了换乘约束; Marín<sup>[8]</sup>在 2009 年对上述研究进行了拓展,在此基础上加入了乘客对交通方式选择的约束; Canca<sup>[9]</sup>在 2014 年在此规划模型基础上,建立了规划、运营指标整合优化模型,并借助数学优化软件对此进行求解; López-Ramos<sup>[10]</sup>在 2017 年进一步扩展了整合优化模型,将线网规划模型与运营阶段的快慢车方案进行结合,建立了非线性整数规划模型,并分步求解。国外在线网的量化生成方面进行了较多研究,但是多以经济性最优为目标,较少涉及客流对线网结构的影响,且基于假设网络,规模小,难以推广。

本文以城市轨道交通主要客流走廊及客流集散点为基础,在城市中建立基础搜索网络,运用图与网络优化理论,在考虑了客流对轨道交通线网结构影响的基础上,建立了城市轨道交通线网生成计算模型,并基于邻域搜索算法进行求解。最后以 X 市为例,对模型及算法的适用性和有效性进行验证。

## 1 基础网络构建

主要客流走廊与客流集散点是确定线网架构、

线路走向的主要影响要素,规划线网须连接主要客流集散点的同时,覆盖主要客流走廊。

### 1.1 主客流走廊与集散点

现阶段,交通客流走廊的识别方法主要有经验判断法、两步聚类识别法和期望线网法等。其中,“虚拟蛛网配流法”是期望线网法中的一种,可以在既有客流需求预测基础上,清晰地表达交通小区客流出行分布,直观地得到主客流走廊。“虚拟蛛网”是反映小区交通联系空间分布特征的网络,避免了传统上小区期望线数量巨大、杂乱无章带来的分析困难。因此,本文选用“虚拟蛛网配流法”甄选主要客流走廊,主要步骤为:

第(1)步:根据客流需求预测,生成交通小区区间的 OD 期望线。

第(2)步:剔除跨小区间的期望线,只保留相邻交通小区的出行期望线,形成“虚拟蛛网”。

第(3)步:在“虚拟蛛网”上进行全有全无客流分配。

第(4)步:根据客流积聚规模和延伸尺度,判断主客流走廊,并根据城市总体规划判定城市发展主轴方向。

客流集散点是城市中主要的客流发生源和吸引源,包括交通枢纽和片区中心。其中,交通枢纽包括公交换乘枢纽、火车站、长途客运站和机场等;片区中心包括行政中心、文化商业点、大型企业、大型居民区、体育广场和旅游景点等。

### 1.2 基础网络构建

一般情况下,城市轨道交通线路沿道路布设,特殊情况下才穿地块建设。因此,在生成线网前需要限定线路经过的可能路段,以此确定生成线网时可搜索的路段范围及搜索方向,这样既可避免规划师的主观臆断,又不会过于依赖模型而失去对线路走向边界的合理把握。我们把用于限定线网搜索范围与搜索方向的拓补网络称为基础网络,基础网络的构建过程为:

第(1)步:沿客流走廊标定符合轨道交通建设条件的主干道路。根据城市的主要交通道路路网,在客流量大、客流集散点密集区域,标定沿客流走廊方向及连通各集散点的主干道路。

第(2)步:结合客流集散点,标定有建设条件的其他道路。若已标定的道路网络无法连通所有必要的客流集散点,需根据道路条件、沿线土地利用情况等综合分析该客流集散点周边道路的轨道交通建设条件,标定可建设轨道交通线路的其他道路。

第 (3) 步: 沿已标定的道路连接各主要客流集散点, 形成的拓扑网络即为基础网络 (如图 1 所示)。对于区位距离较近的集散点进行合并, 降低模型求解复杂度的同时, 减少生成的轨道交通线路的绕行距离。

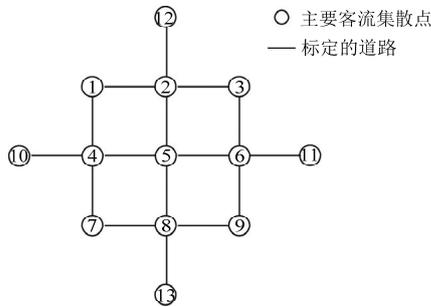


图 1 基础网络示意图

Fig.1 Basic network

## 2 线网生成模型

### 2.1 模型假设

为减少模型的复杂度, 模型的建立遵循以下假设条件:

(1) 假设乘客出行过程中都选择通向目的地的最短路径。

(2) 模型只考虑轨道交通线网方案的变化对轨道交通客流分担的影响, 不考虑其对公共交通出行总量的影响。

(3) 该模型不考虑区间曲线段对旅行时间的影

响。基础网络中主要客流集散点构成点集合  $N$ , 路段构成边集合  $E$ , 两节点之间的邻接距离为两点间的道路长度, 则基础网络可表示为带权重的无向图  $G=G(N,E)$ 。模型中各变量与集合的含义如表 1 所示。

### 2.2 目标函数

乘客出行中对于常规公交和轨道交通方式的选择遵从二元 Logit 模型。城市居民对于公共交通方式的选择会受诸多因素的影响, 但其中, 出行效率普遍被认为是最关键的影响因素。因此, 为了降低模型复杂度, 本文只考虑出行效率这一因素, 则轨道交通的分担率可表示为:

$$f_w^{RRTN} = \frac{e^{-(\alpha^{RRTN} + \beta u_w^{RRTN})}}{\sum_{i \in \{RRTN, Alt\}} e^{-(\alpha^i + \beta u_w^i)}}, w \in W \quad (1)$$

式中: RRTN、Alt 分别为轨道交通、常规公交两种交通方式;  $u_w^i$  为起讫点对  $w$  间乘坐交通方式  $i$  的出

行时间;  $\alpha^i$ 、 $\beta$  分别为待定系数。

式 (1) 简化后得到:

$$f_w^{RRTN} = \frac{1}{1 + e^{\alpha - \beta \Delta t}}, w \in W \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为简化后的系数, 满足  $\alpha = \alpha^{RRTN} - \alpha^{Alt}$ ;  $\Delta t$  为轨道交通与常规公交相比节省的时间,  $\Delta t = u_w^{Alt} - u_w^{RRTN}$ 。

表 1 模型中的变量和集合

Table 1 Variables and sets in the model

| 变量            | 含义   |
|---------------|--|
| $W$           | 起讫点对集合, $w \in W$                                |
| $L$           | 线网中的线路集合, $l \in L$                              |
| $N(i)$        | 表示与节点 $i$ 相邻的点组成的集合                              |
| $u_w^{RRTN}$  | 起讫点对 $w$ 间乘坐轨道交通最短时间, 单位: min                    |
| $u_w^{Alt}$   | 起讫点对 $w$ 间乘坐常规公交最短时间, 单位: min                    |
| $g_w$         | 起讫点对 $w$ 间的公共交通客流需求                              |
| $f_w^{RRTN}$  | 起讫点对 $w$ 间轨道交通出行量占公共交通的比例                        |
| $d_{ij}$      | 区间 $\{i, j\}$ 的长度, 单位: km                        |
| $x_{ij}$      | 线网经过边 $\{i, j\}$ 时为 1, 否则为 0                     |
| $x_{ij}^l$    | 线路 $l$ 经过边 $\{i, j\}$ 时为 1, 否则为 0                |
| $y_i$         | 线网经过节点 $i$ 时为 1, 否则为 0                           |
| $y_i^l$       | 线路 $l$ 经过点 $i$ 时为 1, 否则为 0                       |
| $f_{ij}^{wl}$ | 起讫点对 $w$ 间的客流经过线路 $l$ 的边 $\{i, j\}$ 时为 1, 否则为 0  |
| $h_l$         | 线网生成过程中线路 $l$ 被选中时为 1, 否则为 0                     |
| $f_i^{wl'}$   | 起讫点对 $w$ 间的客流在 $i$ 点由线路 $l$ 换乘至 $l'$ 时为 1, 否则为 0 |

从乘客角度看, 应减少乘客出行时间, 提高轨道交通吸引力。因此, 本文考虑了轨道交通线网方案的变化对轨道交通客流分担的影响, 旨在提高乘客出行效率、增加轨道交通竞争力; 从运营者角度看, 应提高轨道交通运能利用率, 增加运营效益。而线网平均负荷强度是反映轨道线网运营效率与经济效益的一个重要指标, 平均负荷强度越高, 说明轨道交通线网利用效率越高, 运营效益就越好。因此, 本文将线网平均负荷强度最大作为目标。

乘坐轨道交通的客流总量  $g^{RRTN}$ 、线网总里程  $L^{RRTN}$  分别为:

$$g^{RRTN} = \sum_{w \in W} g_w f_w^{RRTN} \quad (3)$$

$$L^{RRTN} = \sum_{\{i, j\} \in E} d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

因此，目标函数可表示为：

$$\text{Max } Z = \frac{g^{\text{RRTN}}}{L^{\text{RRTN}}} = \frac{\sum_{w \in W} g_w f_w^{\text{RRTN}}}{\sum_{\{i,j\} \in E} d_{ij} x_{ij}} \quad (5)$$

### 2.3 约束条件

(1) 拓扑关系约束

$$x_{ij}^l \leq y_j^l, \quad l \in L, \{i, j\} \in E \quad (6)$$

$$x_{ij}^l \leq y_j^l, \quad l \in L, \{i, j\} \in E \quad (7)$$

$$x_{ij}^l = x_{ji}^l, \quad l \in L, \{i, j\} \in E \quad (8)$$

$$y_{ij}^l \leq y_i, \quad l \in L, i \in N \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{l \in L} x_{ij}^l, \quad \{i, j\} \in E \quad (10)$$

$$x_{ij}^l \leq x_{ij}, \quad l \in L, \{i, j\} \in E \quad (11)$$

式(6)、式(7)表示线路*l*经过区间*{i, j}*∈*E*时，必经过*i*点和*j*点；式(8)表示线网为无向网络；式(9)~式(11)表示当区间*{i, j}*属于线路*l*时，生成的线网必定包含区间*{i, j}*，反之，当生成的线网包含区间*{i, j}*时必有线路经过该区间。

(2) 节点和区间重复度约束

$$\sum_{l \in L} x_{ij}^l \leq r x_{ij}, \quad \{i, j\} \in E \quad (12)$$

$$\sum_{l \in L} x_i^l \leq \lambda x_i, \quad i \in N \quad (13)$$

式(12)和式(13)分别表示生成的线网中区间*{i, j}*和点*i*所允许经过的最大线路数量，*r*、*λ*为重复度参数。

(3) 线路条件约束

$$\sum_{\{i,j\} \in E} x_{ij}^l d_{ij} \in (L_{\min}, L_{\max}), \quad l \in L \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N(i)} x_{ij}^l \leq 2, \quad \{i, j\} \in E \quad (15)$$

$$h_l + \sum_{\{i,j\} \in E} x_{ij}^l = \sum_{i \in N} y_i^l, \quad \{i, j\} \in E, l \in L \quad (16)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^l \leq |B| - 1, B \subset N, |B| \geq 2, \{i, j\} \in E \quad (17)$$

式(14)表示单条线路长度约束，*d<sub>ij</sub>*为区间*{i, j}*∈*E*的长度，*L<sub>min</sub>*、*L<sub>max</sub>*为单条线路长度的限值；式(15)表示线路*l*在*i*点无支线；式(16)~式(17)保证线路连续且无环路，*B*为*N*的任意子集。

(4) 客流平衡约束

$$\sum_{l \in L} \sum_{i:(i,d^w) \in E} f_{id^w}^{wl} = \sum_{l \in L} \sum_{j:(o^w,j) \in E} f_{o^w j}^{wl}, \quad w = (o^w, d^w) \in W \quad (18)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{i:(i,k) \in E} f_{ik}^{wl} - \sum_{l \in L} \sum_{j:(k,j) \in E} f_{kj}^{wl} = 0 \quad w = (o^w, d^w) \in W \quad (19)$$

$$f_{ij}^{wl} + f_{ji}^{wl} \leq x_{ij}^l, \quad l \in L, \{i, j\} \in E, w \in W \quad (20)$$

式(18)表示起点流入的客流量与讫点流出的客流量相等，其中，*o<sup>w</sup>*表示起点，*d<sup>w</sup>*表示讫点；式(19)表示同一客流在路径中间点流入的客流量与流出的客流量相等；式(20)表示路径中不出现回流。

(5) 换乘条件约束

$$f_i^{wl'} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left( \sum_{k:\{k,i\} \in E} f_{ki}^{wl} + \sum_{j:\{i,j\} \in E} f_{ij}^{wl'} \right) \right\rfloor \quad (21)$$

$$l \in L, l' \in L, w \in W$$

式(21)用于判断起讫点对*w*间的客流是否在站点*i*从线路*l*换乘到了线路*l'*，发生换乘时*f<sub>i</sub><sup>wl'</sup>* = 1，否则为*f<sub>i</sub><sup>wl'</sup>* = 0。

(6) 线网规模约束

确定城市轨道交通线网规模常用的方法包括按交通需求推算的交通需求分析法和按人均拥有里程等参数匡算的服务水平法等。据研究表明，人均拥有里程数与客运强度具有一定的相关性，一定范围的人均拥有里程可以使客运强度具有更高的发展空间<sup>[11]</sup>。因此，本文选用“人均拥有里程法”来匡算线网规模，如式(22)所示。

$$\frac{\sum_{l \in L} \sum_{\{i,j\} \in E} x_{ij}^l d_{ij}}{C} \in (\mu_1, \mu_2) \quad (22)$$

式中：*μ<sub>1</sub>*、*μ<sub>2</sub>*为人均拥有里程数限值，单位：km/万人；*C*为城区人口数量。其中，线网总里程范围的取值还应该综合考虑城市土地利用规模、社会经济发展水平等因素的影响。

(7) 舒适度水平约束

在最大化线网平均负荷强度的同时必须满足线路舒适度的要求。因此，模型中引入“舒适度水平约束”。本文用车内站席密度表示乘客的舒适度水平，如式(23)所示。

$$\frac{g_{cs,max}^l \varphi}{V_{AW_2} n} < \frac{P_{AW_3}}{P_{AW_2}} \quad (23)$$

式中：*g<sub>cs,max</sub><sup>l</sup>*为线路*l*的日最大断面流量；*φ*为日高峰小时系数；*V<sub>AW<sub>2</sub></sub>*为列车定员载荷；*n*为高峰小时行车密度；*P<sub>AW<sub>2</sub></sub>*为定员状况下的站席密度，为6人/m<sup>2</sup>；*P<sub>AW<sub>3</sub></sub>*为超员状况下的站席密度，为9人/m<sup>2</sup>。《城市轨道交通工程项目建设标准》(建标 104—2008)中规定，站席密度为9人/m<sup>2</sup>时是“非常拥挤”的状态。

### 3 邻域搜索算法

该模型属于 NP-hard 问题，待求变量随着线网节点数量的增加而急剧增加，求解时具有较高的复杂度。模拟退火算法是一种基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的随机寻优算法，具有强鲁棒性、全局收敛性及广泛的适应性，为求解 NP-hard 问题提供了一种思路。因此，本文基于模拟退火算法通用框架设计求解线网生成模型的邻域搜索算法。

为在迭代过程中获取多样性的扰动解，本文中设计有 4 种邻域变换算子：随机增加一条线路、随机删除一条线路、随机删除线路的部分区间、随机增加线路的部分区间（如图 2~图 5 所示）。按照一定的概率执行不同的邻域变换算子，每次迭代随机对当前解  $G_{curr}$  实施不同类型的扰动，以获得不同的新解  $G_{new}$ 。其中，各算子可以单独执行，也可同时执行，比如随机增加一条线路的同时随机删除另一条线路。

设  $f(G_{curr})$ 、 $f(G_{new})$ 、 $f(G_{best})$  分别为当前解、新解（扰动解）及当前最优解对应的目标函数值，

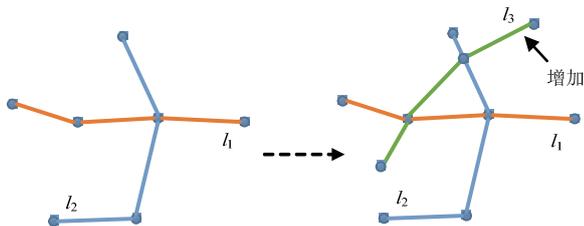


图 2 随机增加一条线路

Fig.2 Random addition of one route

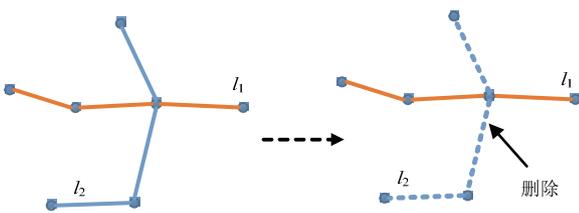


图 3 随机删除一条线路

Fig.3 Random deletion of one route

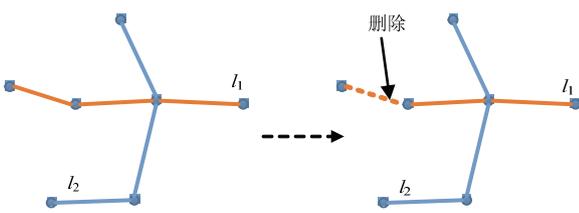


图 4 随机删除线路的部分区间

Fig.4 Random deletion of partial route

若  $f(G_{new}) > f(G_{curr})$ ，则接受  $G_{new}$  作为新的当前解，否则，根据 Metropolis 准则接受  $G_{new}$ ，接受概率为：

$$p = e^{[f(G_{new}) - f(G_{curr})] / \tau} \quad (24)$$

式中： $\tau$  为当前温度。算法的总体流程如图 6 所示。

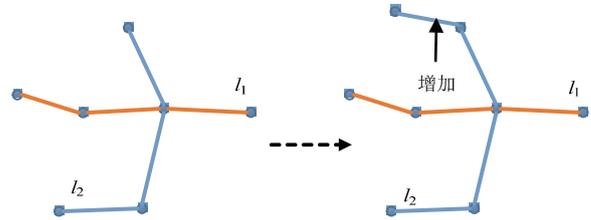


图 5 随机增加线路的部分区间

Fig.5 Random addition of partial route

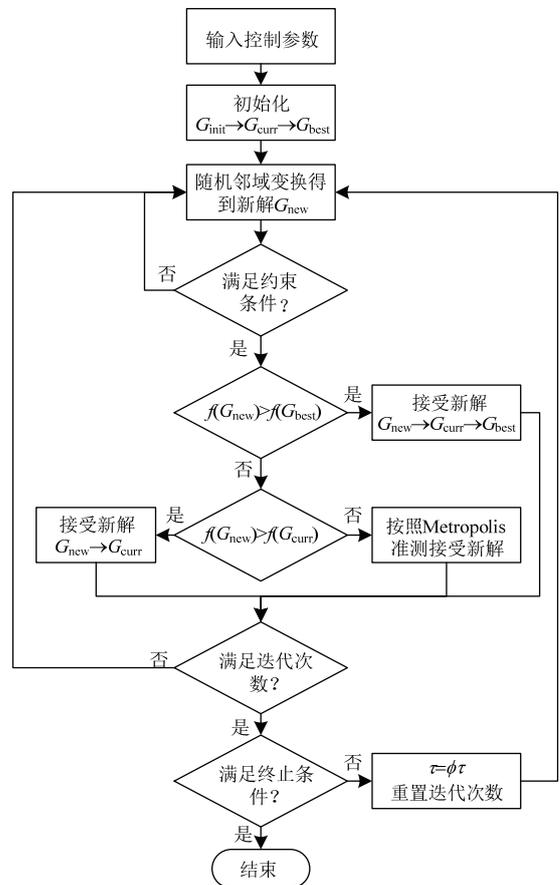


图 6 算法总体流程

Fig.6 Overall flow chart of algorithm

### 4 案例分析

#### 4.1 案例概况

X 市是某省下辖市，市区总面积接近 2000km<sup>2</sup>，根据该城市远期规划，市域总人口控制在 450 万人左右。基于远期公共交通客流预测数据，利用“虚拟蛛网配流法”得到该市公共交通主要客流走廊，

并结合该市总体规划得到该市未来发展主轴，如图7所示。该市客流集散点分为重要的市区政府行政中心、交通枢纽中心、大型居住区、商业区以及旅游景点等，通过对客流集散点筛选，得到96个客流集散点如图8所示。

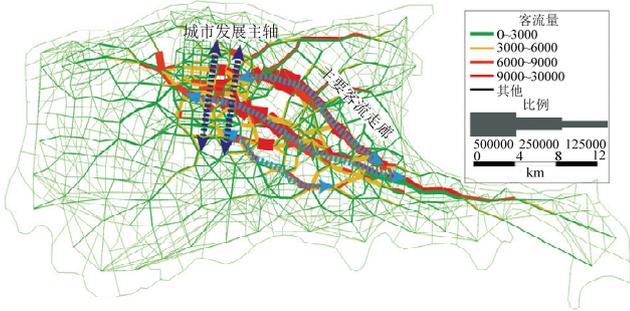


图7 公共交通主要客流走廊和城市发展主轴

Fig.7 Main passenger flow corridors for public transport and the main axis of urban development

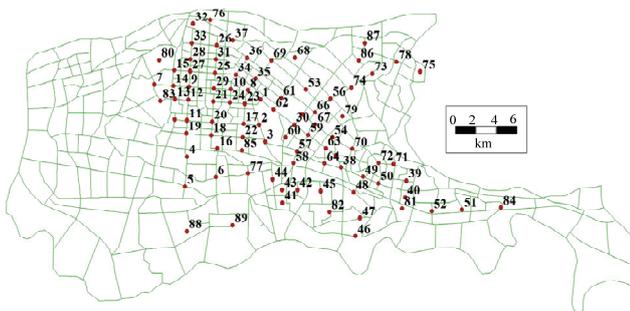


图8 客流集散点分布

Fig.8 Distribution of passenger distributing centers

### 4.2 参数取值

模型中的参数取值如表2所示。

表2 模型参数取值

Table 2 Values of model parameters

| 参数                                | 取值                      |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 万人拥有里程(km/万人)                     | 0.2~0.4 <sup>[11]</sup> |
| 单条线路长度 L(km)                      | 15~40 <sup>[12]</sup>   |
| 列车定员载荷 $V_{AW_2}$ (人/列)           | 1460                    |
| 列车最大行车密度 $n$ (对/h)                | 30                      |
| 日高峰小时系数                           | 0.25                    |
| 二元 Logit 模型参数 ( $\alpha, \beta$ ) | (0,1) <sup>[9]</sup>    |
| 最低温度 $T_{final}$                  | 0.01                    |
| 节点最大重复度 $\lambda$                 | 3                       |
| 线路区间最大重复度 $r$                     | 2                       |
| 退火速率 $\phi$                       | 0.9                     |
| 最大迭代次数                            | 1000                    |

### 4.3 初始解构建

从该市城市空间结构特点来看，该市属于组团用地布局并向带状过渡，未来东西向主城区之间以及各组团之间客流出行日益增多。结合客流走廊分布特征、市内主轴线和主要交通道路，建立该市基础网络，如图9所示。

结合相关线网形态分析可知，与X市相适应的线网结构类型为放射状，线型主要以“L”形与“1”形为主，其基本形态总体上类似于Turner型，如图10(a)所示。因此，本文选取Turner型图的变形形态作为求解时的初始线网原型，如图10(b)所示。在基础网络中选取与初始线网原型相对应且形态较好的线网形态作为初始解。选取的初始解由3条线路组成，如表3所示。

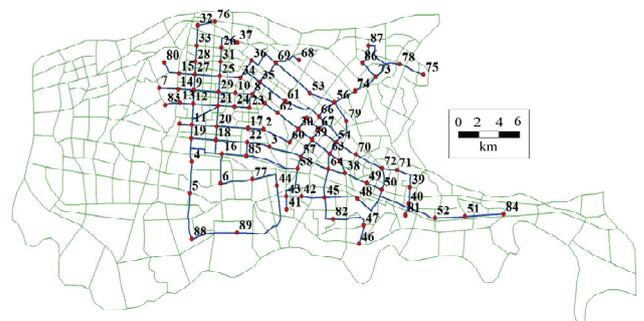
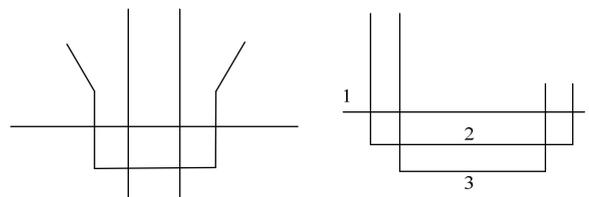


图9 X市区的基础网络

Fig.9 Basic network of X city



(a) Turner 型线网

(b) 变形

图10 Turner 型线网及其变形

Fig.10 Turner type network and its variant

表3 初始解对应的线路

Table 3 Routes of the initial solution

| 编号 | 各线路上的客流集散点                              | 长度 (km) |
|----|---|---------|
| 1  | 7—14—9—29—10—8—1—                       | 31.6    |
|    | 62—30—59—63—55—38—49—50—40—52           |         |
| 2  | 76—32—33—28—27—9—12—11—20—17            | 38.1    |
|    | —2—60—30—65—67—54—70—72—71—<br>39—40—81 |         |
| 3  | 37—26—31—25—29—21—20—18—16—             | 36.5    |
|    | 6—77—44—43—42—45—48—50—72               |         |

### 4.4 结果分析

编程求解得到的最优解对应的目标函数值为 0.91 万人/km·d，而初始解的目标函数值为 0.78 万人/km·d，与最优解较接近，说明选取的“Turner 型”初始解方案较为合理。程序能够收敛稳定，算法的迭代过程如图 11 所示。

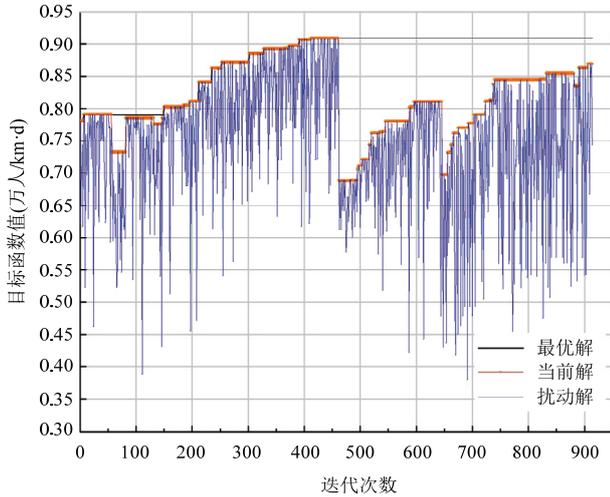


图 11 算法迭代过程

Fig.11 Iterative process of algorithm

计算得到的最优线网由 5 条线路组成，总长度为 147.5km，最优线网中各线路走向如表 4 所示。各线路两侧 600m 的影响范围带，基本覆盖市内核心区域，总体实现了对重要组团的连接，且在主要客流走廊和城市发展主轴方向均有线路布局，如图 12 所示。

表 4 计算得到的各线路  
Table 4 Calculated routes

| 编号 | 各线路上的客流集散点                   | 长度 (km) |
|----|------------------------------|---------|
| 1  | 7—14—9—29—10—8—1—62—30—59—   | 33.93   |
|    | 63—55—38—49—50—40—52—51      |         |
|    | 32—33—28—27—9—12—11—20—17—2— |         |
| 2  | 60—30—65—67—66—54—70—72—71—  | 39.29   |
|    | 39—40—81                     |         |
| 3  | 37—26—31—25—29—21—20—18—16—  | 32.1    |
|    | 6—77—44—43—42—45—48—50       |         |
| 4  | 23—24—21—11—19—18—22—3—57—58 | 19.47   |
| 5  | 79—66—56—53—69—35—34—25—27—9 | 22.73   |

根据相关资料可知，该市远期既有有线网规划方案由 6 条线路组成，线网规模达到 182.5km。本方案与既有规划方案相比，能够节约线网里程约 35km。因此，用该模型生成的线网具有规模小、线

网利用率高的特点，体现了小规模线网输送尽可能多的客流<sup>[13]</sup>的规划理念，可为规划者提供一定的参考。

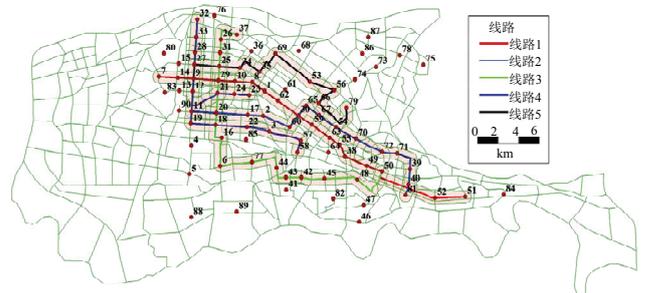


图 12 线路两侧 600m 影响范围

Fig.12 600m range of influence on both sides of the lines

## 5 结论

本文基于图与网络优化理论，对城市轨道交通规划线网的定量化生成进行了研究，主要结论为：

(1) 结合城市道路网分布，提出了以城市主要客流交通走廊和主要客流集散点为核心的基础网络构建方法，用于确定线网生成时的搜索范围与搜索方向。

(2) 基于图与网络流理论，建立了以线网平均负荷强度最大为目标，以线网拓扑关系、节点和区间重复度、线路条件、客流平衡、换乘条件、线网规模和舒适度水平为约束的规划线网生成模型，并基于模拟退火框架设计了求解大规模线网的邻域搜索算法。

(3) 以 X 市为例对本模型和算法的适用性和有效性进行了验证。结果表明：基于该模型生成的规划线网具有建设规模小、线路利用率高的特点，本算法也能收敛稳定。

本文为城市轨道交通规划阶段线网的生成提供了一种定量化方法，对城市轨道交通线网规划具有一定的指导意义。

### 参考文献

[1] 杨京帅. 城市轨道交通线网合理规模与布局方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006 (Yang Jingshuai. Rational scale & layout methods for urban rail transit network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006 (in Chinese))

[2] 罗小强. 城市轨道交通线网布局规划理论与方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010 (Luo Xiaoqiang. Study on the urban rail transit network planning theory and method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010 (in Chinese))

[3] 何明. 城市轨道交通网络生成技术及可靠性分析 [D].

南京:东南大学, 2011

[4] 杨明. 大都市区轨道交通线网模式与布局研究[D]. 南京: 东南大学, 2014 (Yang Ming. Research on the pattern and planning of metropolitan rail transit network [D]. Nanjing: Southeast University, 2014 (in Chinese))

[5] Dicesare F. A system analysis approach to urban rapid transit guide way location [D]. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, 1970

[6] Church R L, Clifford T J. Discussion of ‘environmental optimization of power lines’ by Economides and Sharifi [J]. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1979, 105(2): 438-439

[7] Garcia R, Mesa J A , Marín A, et al. Analysis of the parameters of transfers in rapid transit network design [C]//5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS’05). Germany, 2006

[8] Marín Á, García-Ródenas R. Location of infrastructure in urban railway networks [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(5): 1461-1477

[9] Canca D, De-Los-Santos A, Laporte G, et al. A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model [J]. Annals of Operations Research, 2014, 246(1/2): 127-144

[10] López-ramos F, Codina E, Marín Á, et al. Integrated approach to network design and frequency setting problem in railway rapid transit systems [J]. Computers & Operations Research, 2017, 80: 128-146

[11] 沈景炎. 客运强度与城市轨道交通线网的合理规模[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(7): 3 (Shen Jingyan. Passenger transport intensity and rational scale of rail transit network [J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(7): 3 (in Chinese))

[12] 刘迁, 许双牛, 吴爽, 等. 我国城市轨道交通线网规划实践与思考[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015 (Liu Qian, Xu Shuangniu, Wu Shuang, et al. The urban rail transit network planning practice and thinking [M]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese))

[13] 吴小萍, 陈秀方. 城市轨道交通网络规划理论方法研究进展[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 111-117 (Wu Xiaoping, Chen Xiufang. Progress of study on urban mass transit network planning theory and methodology [J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 111-117 (in Chinese))

柴树山 (1990— ), 男, 博士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

梁青槐 (1967— ), 男, 博士, 教授。主要从事城市轨道交通线网规划与线路设计方面的研究。

周 宇 (1989— ), 男, 硕士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

王 恒 (1994— ), 男, 硕士研究生。主要从事城市轨道交通线网规划方面的研究。

(上接第 120 页)

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 649-656 (in Chinese))

[27] 杨果林, 申权, 杨啸, 等. 基覆边坡支撑结构的加速度放大系数数值与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 374-381 (Yang Guolin, Shen Quan, Yang Xiao, et al. Numerical and experimental study on amplification coefficient of acceleration of retaining structures of bedrock and overburden layer slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 374-381 (in Chinese))

范凯祥 (1988— ), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

申玉生 (1976— ), 男, 博士, 副教授。主要从事隧道及地下工程施工力学及抗减震方面的研究。

高 波 (1957— ), 男, 博士, 教授。主要从事隧道及地下工程施工力学、高速铁路空气动力学以及抗减震方面的研究。

郑 清 (1986— ), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

闫高明 (1992— ), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。

王帅帅 (1988— ), 男, 博士, 高级工程师。主要从事隧道及地下工程施工力学以及抗减震方面的生产与研究。

黄海峰 (1993— ), 男, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程抗减震方面的研究。