

# 市郊线与市区轨道网络衔接的设计比选方法

吴放, 顾保南

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 分析了现有数学模型对市郊线与市区轨道网络衔接设计问题的不适用性, 在此基础上提出两阶段设计方法, 并着重对第一阶段——衔接方案集的生成方法进行了阐述. 设计了一个以贪婪搜索思想为基础的启发式算法, 求解市郊线与市区轨道网络衔接的优化方案. 从寻优过程和换乘主导性两个角度分别生成了较优的可选设计方案集合. 这些备选方案保证了较高的方案设计质量, 并能覆盖不同站间距的郊区线衔接模式, 为下一阶段的方案评价比选提供基础. 最后通过一个算例实现了所提出的备选衔接方案集合生成方法, 证明了这一方法在大规模轨道网络中的适用性.

**关键词:** 轨道交通; 市郊线; 衔接设计; 启发式算法

**中图分类号:** U 212.3; U 121

**文献标志码:** A

## A Novel Method for Designing and Selecting Connection Scheme Between Suburban Line and Urban Rail Transit Network

WU Fang, GU Baonan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A two-stage approach was proposed to solve the problem of connecting suburban rail line to urban rail network based on the current model's impracticability. Focusing on the first stage, the paper articulates how the set of connection design schemes is generated. A greedy search based heuristic algorithm was designed to solve the optimization problem of connecting suburban lines and urban rail network. And optimum connection scheme set was sorted out from the perspectives respectively regarding optimization searching process and different transfer coefficients that reveal the dominance of transfer in path length. High quality of connection design schemes can be ensured by these optional designs, which can also cover various connection modes of different station spacing, providing solid basis for evaluation and selection in the second stage. Finally, the aforementioned

method was implemented in an example, generating an optimized connection design set, which proves the applicability of this novel design method in large scale rail network connection problem.

**Key words:** urban rail transit; suburban rail line; connection design; heuristic algorithm

我国很多大城市的市郊线路规划设计都是在市区轨道交通网络基本成形后才开始的, 新建郊区线与市区轨道网络的衔接设计问题也就随之而来. 将郊区线路连接到市区网络的可选方案非常多, 但要从选出最优方案, 需要考虑方方面面的问题. 轨道交通项目耗资巨大, 涉及到全社会不同的利益主体<sup>[1-2]</sup>, 规划设计者希望能够在各方利益中进行平衡. 轨道交通项目又具有明显的外部效益, 例如影响城市规划和地区经济、改善交通结构、缓解空气污染等等, 这些效益很难通过简单的规则予以量化. 因此, 通过简单的标准数学模型很难完整地解决轨道网络的设计问题<sup>[3-4]</sup>. 目前针对新建市郊线路与既有网络的衔接问题, 不管是相对宏观的模式选择上, 还是微观的衔接设计方案上, 研究都相对较少.

不少研究者通过建立优化模型解决交通网络设计问题. 典型的网络设计问题是通过建立双层模型, 下层代表给定投资下的需求与网络性能平衡, 上层代表交通规划者基于下层模型求解出的平衡流量, 以社会福利最大化为目标的投资决策<sup>[5-6]</sup>. 其中, 决策变量为离散型变量的双层规划模型可用来解决网络拓扑最优更改问题.

国内针对新建成区的交通设施与既有基础设施网络连接的研究主要集中在道路交通上. 如采用双层规划法建立新建交通小区与现有路网连接的优化模型<sup>[7]</sup>. 杨超等根据道路网络的特点, 提出生成节点

收稿日期: 2012-05-13

基金项目: 上海市科委科研计划(11231203002)

第一作者: 吴放(1985—), 女, 博士生, 主要研究方向为轨道交通规划与设计. E-mail: tjwufang@126.com

通讯作者: 顾保南(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通规划与设计. E-mail: gbnnyh@163.com

与已有路网的连接规则<sup>[8]</sup>. 新建设计目前常用的双层规划模型在解决郊区线路与市区轨道网络衔接时存在以下问题:① 是否修建市区新建轨道段作为决策变量相互并不独立,它们必须能够形成首尾相接的线路,这就使得适用于道路网络新建路段优化模型的算法难以适用<sup>[9]</sup>,而若采用枚举法,计算量将相当大;② 轨道交通乘客的出行时间受路段流量的影响非常小,虽然很多研究者将拥挤计入乘客的出行广义费用中,建立路段流量与乘客出行广义费用关系,形成上下层模型的反馈机制,但是将舒适度这一相对主观的因素准确地转化成费用并非易事,并且这也将极大地影响模型的结果;③ 轨道交通与其他交通方式存在竞争关系,其客流量很大程度上取决于网络设计,直接以固定的 OD 矩阵作为已知条件输入,可靠性不高,且新城的客流预测目前在理论和基础数据积累上仍有所欠缺;④ 很多因素往往难以通过简单的线性模型表达,若将非线性项加入到双层模型的目标函数中,求解更为困难<sup>[10]</sup>,因此优化模型只能求出局部“最优”方案.

郊区线与市区轨道网络的衔接设计实际上也可以看成郊区线路在市区的走向设计问题. 针对轨道线路设计问题,研究者们提出的方法主要分为两类:数学模型精确求解<sup>[11]</sup>方法和启发式方法. 但是这些模型都没有考虑乘客在网络中的直达性或出行效率,而仅仅将所有节点连接起来,而且数学规划模型只对小规模设计问题有效. 线路设计问题的启发式方法通常是在特定区域(或走廊)内,给定车站个数,以站间距上下限为限制条件,选出覆盖客流量最大的一组有序的节点<sup>[12]</sup>. 而在郊区线与市区轨道网衔接设计中,最为直接的目标就是要将郊区出行者更便捷地与市区联系起来,一般的线路设计模型和启发式方法难以解决这一问题.

基于以上分析,需要寻找一种更适用于市郊线与市区轨道网衔接问题的设计方法.

## 1 市郊线与市区轨道网衔接设计的两阶段方法

鉴于问题的复杂性,很难通过一个标准的数学模型描述解决衔接设计问题. 为了更加全面、合理地解决这一问题,可将线路衔接设计过程分解为两个阶段:① 产生一系列较优方案(建立方案的备选集),② 对方案进行多目标多准则比选.

第一阶段的主要目标是寻找一系列较优的可选

衔接方案. 这里较优的衡量标准是:在修建尽可能少的衔接车站和线路前提下,实现从郊区车站到达市区车站的总出行成本尽可能低的效果. 在衔接方案生成过程中,目标不是找出某一边界条件下的最优设计方案. 事实上,这样的最优方案只是从一个单一层面来说的最优,并非全局最优解. 衔接效率的提高往往要以延长线路和增设衔接车站为代价,因此在寻找此阶段最优衔接方案的过程中,由于成本和效益的相互抵消,每一中间方案都有可能成为最终的最优方案. 另一方面,若郊区线以大站距模式衔接市区轨道网络,那么由于列车旅行速度的提高,乘客进入市区的出行中,实际物理距离的相对重要性降低,而换乘次数的重要性则得到提升. 引入换乘折算系数这一概念来设定换乘在出行中的重要或主导程度,就可以产生不同站间距模式的衔接方案. 当换乘折算系数取值高时,换乘占路径选择中的主导地位,倾向于产生郊区线以大站距进入市区,衔接少量枢纽站的衔接方案;反之,则将产生郊区线以小站距延伸进入市区,形成多个小规模换乘站的模式. 不同的换乘折算系数设定,以及与之相对应的“最优”方案搜索过程中的中间方案,分别从横向和纵向层面形成一系列备选衔接方案.

第二阶段,对上一阶段形成的方案分别进行各项评价指标的计算和比选. 由于方案已经确定,评价指标值可以相对准确地计算出来. 从不同角度对各种线路设计方案进行多层次多因素的比较,将难以量化的外部成本和效益内部化,最终实现方案的合理选择. 由于目前已经存在可选的多目标多准则方案评价比选方法,而设计的主要难点在于具体方案生成的过程,因此本文着重对郊区线衔接市区轨道网的方案集的构建方法进行讨论.

## 2 备选衔接方案集的构建

### 2.1 方法思路描述

将市郊线与市区轨道网的衔接设计看成衔接站的选择问题,设市区车站个数为  $N$ ,那么理论上将存在  $P\left(\frac{1}{N}\right)+P\left(\frac{2}{N}\right)+\cdots+P\left(\frac{N}{N}\right)$  种衔接方案. 若每增加一个衔接站时都需遍历市区所有车站节点,采用常规的深度优先或广度优先的算法寻求最优解,耗费的计算时间和占用的空间资源非常大,而且计算结果也只找出惟一最优解,无法实现这一阶段生成多个可选较优解的目标. 受贪婪算法思想的启发,在

这里进行衔接车站的遍历和选择,其基本思想为郊区线路与市区网络每一个衔接站的增设都是在当前这一步中最优的选择.虽然最终形成的方案并不能保证为全局最优解,但这一阶段的目标不在于寻求最优解,而是需要产生一系列较优解.

郊区车站节点与市区任意车站节点间的网络距离定义为

$$d_{0n} = \min_{p \in P} \left( \sum d_{i,p} + \gamma \cdot \sum t_{p,q} \right) \quad (1)$$

从郊区新城车站出发的乘客到达网络其他所有车站的网络距离之和为

$$D^{(i)} = \sum f_{0n} d_{0n}^{(i)} \quad (2)$$

式中:  $\sum d_{i,p}$  为乘客在节点  $m$  和  $n$  之间的路径  $p$  上乘坐列车通过的总距离;  $t_{p,q}$  为郊区新城车站与市区车站  $n$  之间路径  $p$  中的第  $q$  次换乘时间;  $P$  为节点  $m$  和  $n$  之间的路径集合;  $\gamma$  为换乘折算系数,反映换乘在路径选择中的重要程度,  $\gamma$  取值越大,换乘主导程度越高;  $f_{0n}$  为郊区新城车站与市区车站  $n$  所在交通小区的交通量;  $d_{0n}^{(i)}$  为有  $i$  个衔接车站时,从郊区新城车站到市区车站  $n$  的网络距离,其中上标  $i$  表示衔接车站个数;  $D^{(i)}$  为有  $i$  个换乘衔接车站时,从郊区新城车站到市区所有车站的乘客出行总网络距离.

当新增第  $i+1$  个衔接站后,郊区新城车站乘客到市区所有车站的总网络距离降低幅度小于某个值,即  $D^{(i)} - D^{(i+1)} < \epsilon$  时,搜索终止.算法思想流程图如图1.

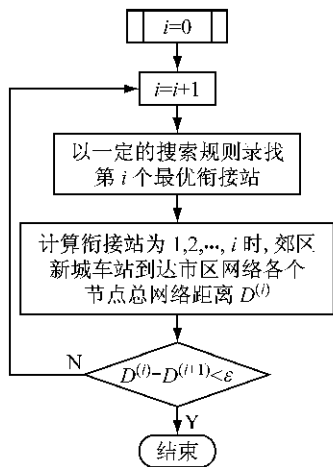


图1 搜索最优方案的流程图

Fig.1 Flowchart of searching for optimum scheme

## 2.2 算法

郊区线路与市区轨道网络的衔接问题中实际上

是一个一对多最短路径问题,但这些路径必须经由几个衔接车站节点,这些中转点的选择问题就变得非常难解,因此这里采用启发式方法来进行寻优.由于郊区线路与市区轨道网络的衔接车站数量十分有限,可以合理地假设所有市区车站都至少需经过1次换乘到达.为了保证在搜索最优解的过程中,每一个中间解都能保持良好的性能,每增加一个衔接车站,都应该是在可选车站中最好的那个.

为了保证每一步都能得到当前最优解,在第  $i$  次搜索中,即增加第  $i$  个衔接车站时,选取的衔接车站符合如下条件:

$$D^{(i)} = \min_{n \in N^{(i-1)}} \left( \sum (d_{E,(i-1)i} + d_{in}) \cdot f_{0n} \right) \quad (3)$$

式中:  $d_{E,(i-1)i}$  为从上一个已选取的衔接点到当前选择的衔接点之间的欧氏距离;  $d_{in}$  为从当前选择的衔接点  $i$  到达市区车站  $n$  的网络距离;  $N^{(i-1)}$  为第  $i-1$  次搜索后保留下来的目的地节点集合.每增加一个衔接站,都能使一系列市区车站以当前最优路径衔接(即无法通过增加其他衔接点来改善衔接效果),在下一轮搜索时将这些节点去除,以免影响后续衔接点的选取.目的地节点  $n$  保留在  $N^{(i)}$  中所需满足的条件为

$$d_{in}^{(i)} > \min_{d_{E,0j} > d_{E,0i}, j \neq n} (d_{E,j} + d_{jn}) \quad (4)$$

式中:  $d_{in}^{(i)}$  为从衔接节点  $i$  到达目的地车站  $n$  的网络距离;  $d_{E,j}$  为从衔接车站  $i$  到车站  $j$  的欧氏距离,车站  $j$  为比衔接车站  $i$  更远离郊区车站的市区轨道交通车站节点,且不为目的地节点  $n$ ;  $d_{jn}$  为从车站  $j$  到目的地车站  $n$  的网络距离.满足上述条件意味着还有可能通过进一步向市区延伸线路增加衔接车站的方式改善到达目的地节点  $n$  的衔接效果,第  $i$  个衔接站不是到达车站  $n$  的最优换乘中转站.如图2所示,设节点2为第  $i$  次搜索选择出来的衔接站,车站1,3,4,5为目的节点,  $N^{(i)} = \{1,3,4,5\}$ .在第  $i+1$  次搜索时,对车站5来说,  $d_{50}^{(i)} > d_{24} + d_{45}$ ;而对车站1来说,除非将市郊线从衔接点2处直接连通,否则将无法进一步提高市郊车站与车站1之间的衔接效率,在下一轮衔接节点的搜索中,应去除目的地节点1.

新增衔接车站后的衔接效果改善如下:

$$D^{(i+1)} - D^{(i)} = \sum_{n \in N^{(i-1)}} \left( \min_{j \in \{1,2,\dots,i\}} (d_{0n,j}) - \min_{j \in \{1,2,\dots,i\}} (d_{0n,j}) \right) \cdot f_{0n} \quad (5)$$

式中,  $d_{0n,j}$  表示从郊区车站节点经由衔接站  $j$  到达目的地节点  $n$  的网络距离.

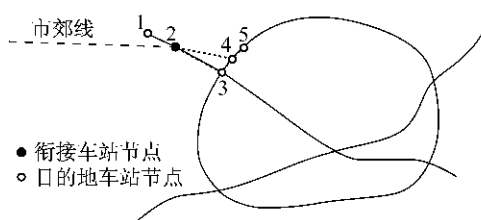


图2 为下一步搜索去除目的地节点的示例

Fig.2 An example for getting rid of some destination stations for the next searching step

算法步骤如下:

(1) 对市区所有车站按与郊区由近及远编号,建立市区站全集  $I$ . 换乘折算系数取值,建立市区车站网络距离矩阵  $A^{(0)}$  和欧氏距离矩阵  $B$ . 郊区节点至市区车站的欧氏距离向量和 OD 向量分别为  $B^{(0)} = (d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0N})^T$ ,  $F = (f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0N})^T$ . 建立市区目的地车站和衔接站集合分别为  $N^{(0)} = I$ ,  $S^{(0)} = \emptyset$ . 令  $i=1$ .

(2) 取  $\min_{m \in \{1, 2, \dots, N\}} \left( \sum_{n=1}^N f_{0n} \cdot (d_{0n} + a_{nm}^{(1)}) \right)$  对应的节点为第一个衔接站,并将衔接站  $s^{(1)}$  放入空集  $S^{(0)}$ ,集合更新为  $S^{(1)}$ . 计算郊区节点与市区网络的乘客总出行距离  $D^{(1)} = \sum_{n \in N} d_n^{(1)} \cdot f_{0n}$ .

(3) 取矩阵  $B$  的第  $s^{(1)}$  列  $B_{s^{(1)}}$ .  $A'^{(1)} = [B_{s^{(1)}}, B_{s^{(1)}}, \dots, B_{s^{(1)}}] + A^{(0)}$ . 判断矩阵  $A'^{(1)}$  中第  $s^{(1)}$  行中每个元素是否满足  $a'_{s^{(1)}n} \leq a'_{mm} \ (\forall m > s^{(1)}, m \neq n)$ ,如果是,将列下标对应的节点从集合  $N^{(0)}$  中去除,得  $N^{(1)}$ . 将矩阵  $A'^{(1)}$  的第  $N^{(1)}$  列元素置 0,  $s^{(1)}$  行置  $\infty$ ,得矩阵  $A^{(2)}$ .

(4)  $i=i+1$ . 取  $\min_{m \in S^{(i-1)}} \left( \sum_{n \notin N^{(i-1)}} a_{mn}^{(i)} \cdot f_{0n} \right)$  对应的节点为第  $i$  个衔接车站  $s^{(i)}$ .

(5) 更新目的地节点与郊区节点的距离:取  $d_n^{(i)} = \min(a_n^{(i)} + \sum_1^i b^{(i)}, d_n^{(i-1)})$ . 其中,  $\sum_1^i b^{(i)}$  为新增第  $i$  个衔接站后,从郊区站经前  $i-1$  个衔接站到第  $i$  个衔接站的总欧氏距离. 郊区站与市区站的乘客出行总距离  $D^{(i)} = \sum_{n \in N} d_n^{(i)} \cdot f_{0n}$ . 若  $D^{(i-1)} - D^{(i)} < \varepsilon$  停止搜索,否则转第(6)步.

(6) 将衔接点  $s^{(i)}$  放入衔接节点集合中,得  $S^{(i)}$ . 计算  $[B_{s^{(i)}}, B_{s^{(i)}}, \dots, B_{s^{(i)}}] + A^{(0)}$ ,并将此矩阵的第  $N^{(i-1)}$  列置 0,  $S^{(i-1)}$  行置  $\infty$ ,得矩阵  $A'^{(i)}$ . 判断  $A'^{(i)}$  第  $s^{(i)}$  行中每个元素是否满足  $a'_{s^{(i)}n} \leq a'_{mm} \ (\forall m > s^{(i)}, m \neq n)$ ,如果是,将列下标对应编号从目的地节点集合中去除,集合更新为  $N^{(i)}$ . 矩阵  $A'^{(i)}$  的第  $N^{(i)}$  列置 0,

$S^{(i)}$  行置  $\infty$ ,得到新矩阵  $A^{(i+1)}$ . 返回第(4)步.

## 2.3 方案集的生成

### 2.3.1 纵向层面的方案生成

按照上述算法,每一步求出的衔接站都是给定换乘折算系数下的最优选择. 进行每一步搜索前,首先将那些无法通过增设衔接车站而获得衔接效率改善的目标车站去除,选取的下一个衔接节点无需兼顾这些目的地节点,那么使得郊区车站节点到达剩余目的地节点的总网络距离最小化的衔接点成为这一步搜索中最好的选择,最大程度地改善了衔接效果.

在不断增加衔接节点的过程中,虽然郊区车站与市区网络的衔接效果得到了改善,但每一步线路的延伸都是以一定的工程费用为代价的. 因此,在进行衔接车站搜索的过程中,将每一轮新增衔接车站的方案都作为一个备选方案,并记录方案的修建线路长度、郊区节点与市区网络节点总距离等信息,以备下一阶段方案比选之用.

### 2.3.2 横向层面的方案生成

换乘折算系数  $\gamma$  的不同取值会让网络设计结果出现很大的差别. Gastner 等曾通过设定路径物理长度与路径段数(类似于换乘次数)之间的相对重要性,在随机节点之间生成了不同结构特征的最优网络<sup>[13]</sup>,在轨道交通衔接设计中同样也存在这一问题. 换乘折算系数取零,换乘没有任何阻抗,此时市郊线向市区延伸的每一步都会选择就近车站衔接,使用尽可能短的线路衔接多个车站. 相反,若换乘折算系数取值很大,换乘主导时,生成的衔接方案更倾向于以较少的衔接站完成郊区线与市区网络的联系. 简单来说,当换乘折算系数  $\gamma$  取值逐渐增大时,选取的衔接站之间的站间距也趋向于变大.

在不考虑换乘,即  $\gamma = 0$  时,才能直接用 Dijkstra, Floyd 等算法通过邻接矩阵求解最短路径长度,而在需要考虑换乘以及换乘惩罚系数不同取值时,可将网络中所有换乘节点按线路进行扩展,如图 3 所示. 扩展后的节点用“换乘边”连接,并以换乘时间或距离对“换乘边”赋以相应权重. 将全网络所有节点都作换乘节点扩展,在此基础上进行最短路径计算,最后将扩展后的节点合并处理,得到构建方案集算法中所需的网络距离矩阵. 例如,图 3 中车站 1 为三线换乘站,经换乘节点扩展后成为 3 个节点,并对两两节点之间用边连接;而换乘节点 1 与节点  $m$  之间的网络距离为  $d_{1m} = \min(d_{1am}, d_{1bm}, d_{1cm})$ .

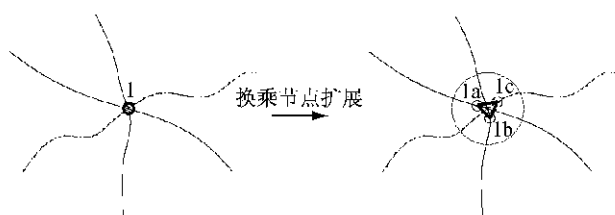


图3 换乘节点扩展示意图

Fig.3 Method for expanding transfer nodes

### 3 算例

以上海轨道交通网络为例,假设新建一条轨道交通线连接位于市区西北方向的嘉定新城与市区轨

道网络,如图4所示。市区轨道网络设为外环以内部分,共9条线173个车站。设定市区两线、三线、四线换乘站的换乘时间分别为3,4,5 min,按轨道交通 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的运营速度,可换算成1.5,2.0,2.5 km距离。利用Google Earth测量车站间欧氏距离,根据轨道交通网络各条线路车站站间距数据及换乘时间、换乘折算系数求解网络距离矩阵。本算例假设郊区新城与市区各轨道交通车站之间的OD量相等。对换乘折算系数 $\gamma$ 分别取0,1,5,求出衔接方案如图4所示。

取 $\gamma=0$ (图5b),衔接站依次为:镇坪路、上海火车站、曲阜路、人民广场、南京东路、老西门、陆家浜路、西藏南路、儿童医学中心。

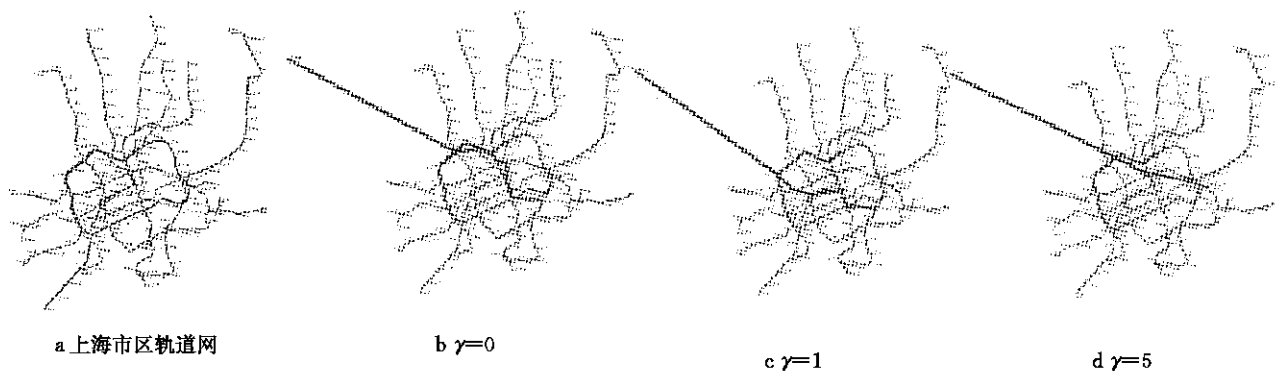


图4 上海市区轨道交通网及衔接方案计算结果

Fig.4 An example of connecting suburban line to urban rail network in Shanghai city of China

取 $\gamma=1$ (图5c),衔接站依次为:金沙江路、江苏路、常熟路、陕西南路、老西门、陆家浜路、西藏南路、儿童医学中心。

取 $\gamma=5$ (图5d),衔接站依次为:镇坪路、人民广场、世纪大道。

在此基础上,分别将每个 $\gamma$ 取值对应的衔接站方案进行中间方案提取,这样可以形成一系列方案,供下一阶段方案评价比选之用。

### 4 结论

采用以上算法能够生成一系列衔接效果较好的郊区线路与市区轨道网络的衔接方案,供下一阶段比选。分两个阶段对市郊线路衔接进行设计可以较合理地解决郊区线衔接设计需要注意的问题。它与现有的方法相比,还具有以下优点:

(1) 在第一阶段寻找“最优”方案的过程中,将目标函数进行了简化,并去除了一些约束条件。这样一方面能够降低求解难度,另一方面可以避免将某些较优的方案舍弃。

(2) 备选方案集包含的方案都是衔接效果较优的方案。这一阶段衔接方案选择的标准是郊区车站与市区所有车站的网络总距离最小,最终得到的“最优”方案可以保证在对应的换乘折算系数取值下最好的衔接效果。而且在生成方案的过程中,每延伸一步增加一个换乘站,产生的这些中间方案都是在当前条件下最好的选择,这些中间方案也都能保证较高的质量。

(3) 通过两个层面生成备选方案,可以使备选方案集覆盖不同的衔接模式。利用对换乘折算系数取值的控制,可以生成以不同站间距延伸进入市区衔接市区轨道网的衔接模式;而方案生成过程中的一些中间方案代表着郊区线路终止于市区外围,与外围车站衔接的模式。

(4) 将对方案的比较选择分离出来,单独作为一个设计步骤,能够更全面准确地对候选方案进行评价。以具体方案为基础,客流量等指标的计算也会更加可靠。

(下转第239页)