

# 2021 第六届“数维杯”大学生 数学建模竞赛论文

## 中小城市地铁运营与建设优化设计

### 摘 要

合理的地铁建设及运营方案对城市交通建设具有深远的影响，针对呼和浩特市地铁运营成本较高、运行效率较低等问题，本文采用了最优发车策略、双层规划选址优化方案、错峰出行交通模型以及基于快速线的公交地铁互补模型等方案来解决。

**对于问题一：**首先，我们分别建立了以乘客候车满意度、坐车满意度和地铁运营满意度为目标函数的多目标优化模型；其次通过对各目标函数进行加权将多目标优化模型单一化成为单目标优化模型；最后以地铁 1 号线的客流数据进行计算得出最优发车策略及车厢数量为：高峰时段发车间隔 6 分钟、平峰时段发车间隔 7 分钟、车厢数量 7 节，同时计算出此策略下的综合满意度更高，证明优化后的发车策略及车厢数量更加合理。

**对于问题二：**首先，我们用双层规划策略建立了考虑社会利益最大化的上层规划，将运营成本、出行成本、旅客数量作为优化目标并通过模糊熵模型将多目标优化转变为了单目标优化任务；其次，建立了基于出行者自身需求的流量分配模型；最后，通过启发式算法对模型迭代求解，优化后确定了 13 个站点位置并由运营成本、旅客成本等推导得出了盈利所需的出行者人数目标为 18.507 万人/日。

**对于问题三：**首先，我们建立了出行量随时间分布模型和错峰上班的交通影响模型；其次，利用 EXCEL 的数据透视分析功能分析客流量数据；最后，利用模型求解错峰调整后各个站点的客流量变化情况，求出各站点交通效益参数，并求得其平均值 $\bar{k}=5\%$ ，证明该措施对缓解交通拥堵具有较好的效果，并给出了具体错峰出行措施。

**对于问题四：**首先，我们从公交站点布局衔接开始，兼顾乘客的出行成本和企业的运营成本；其次，建立了总成本最低的社区公交站点布设模型；最后，基于快速路的公交站点给出了若干新增的公交路线，实现了地铁和公交互补。

**关键词：**轨道交通；发车间隔；双层规划；错峰出行；公交衔接

## 目 录

摘要 .....	I
1、问题重述 .....	2
2、问题分析 .....	3
2.1 问题 1 的分析 .....	3
2.2 问题 2 的分析 .....	3
2.3 问题 3 的分析 .....	3
2.4 问题 4 的分析 .....	4
3、模型假设 .....	4
4、定义与符号说明 .....	4
5、模型的建立及求解 .....	5
5.1 问题 1 的模型 .....	5
5.1.1 最优车厢数量及发车间隔确定模型的确定 .....	5
5.1.2 最优车厢数量及发车间隔确定模型的求解 .....	8
5.1.3 目前发车方案合理性分析 .....	11
5.2 问题 2 的模型 .....	11
5.2.1 呼和浩特市现有地铁建设与城市情况分析 .....	11
5.2.2 站点选址与盈利模型的确定 .....	14
5.2.3 站点选址与盈利模型的求解 .....	17
5.2.4 结果 .....	19
5.3 问题 3 的模型 .....	19
5.3.1 错峰出行交通影响模型的确定 .....	20
5.3.2 错峰出行交通影响模型的求解 .....	23
5.3.3 结果 .....	24
5.4 问题 4 的模型 .....	25
5.4.1 公交站点选址影响因素 .....	25
5.4.2 公交线路选址模型的建立 .....	26
5.4.3 模型的参数 .....	26
5.4.4 模型的求解 .....	27
6、模型评价改进与推广 .....	29
6.1 模型的优点 .....	29
6.2 模型的缺点 .....	29
6.3 模型的推广 .....	29
参考文献 .....	30

## 1、问题重述

已知呼和浩特市两条地铁线路采取的发车方式为高峰发车间隔 6 分钟，平峰发车间隔 10 分钟，晚 20 点以后发车间隔 12 分钟的方案。首班车 6:00 发出，末班车 22:00 发出。城市工作日早高峰为 7:00-9:00，晚高峰为 17:00-19:00；节假日及双休日早高峰为 9:00-11:00，晚高峰为 16:00-18:00。

试利用数学建模的方法解决以下问题：

**问题 1：**在附件 2 中给出了 2020 年 9 月 1 日至 2020 年 9 月 14 日模拟的各站点进出站人数数据。假定每周的乘车人数与附件 2 中的乘车人数不存在显著性差异，每列地铁有 6 节车厢，每节车厢最大容纳 400 人次。试分析目前发车方案的合理性，并提出一个最优的车厢数量及发车间隔确定模型，同时利用更多的仿真模拟数据对优化前后的方案展开对比分析。

**问题 2：**呼和浩特市未来仍在考虑新增地铁线路用以缓解交通压力和碳排放。然而，相关管理部门的建设经费及后期运营经费非常有限。结合附件 1 及呼和浩特市城市自身特点你能否提出一个合理的站点选址方案以确保更多的居民会选择地铁出行方式，并预测出每天总计乘坐地铁人数达到多少才能够实现地铁运营的盈利目标。

**问题 3：**在新冠肺炎疫情影响下居民出行乘坐公共交通工具应避免过度拥挤而造成疫情的快速传播。考虑到疫情依旧持续较长的时间，您能否提出一种错峰出行方案。这一方案通过对不同站点附近主要上学或上班等人员的合理上下班时间的制定最大限度的减少高峰时期出行人数，并实现最终平峰目标。

**问题 4：**在充分考虑呼和浩特市城市快速路的基础之上，你能否提出一个地铁和公交互补的若干新增公交线路，以满足更多人员高峰出行时期的出行效率。

## 2、问题分析

众多地铁因其高昂的建设成本、后期运营成本及便民的收费标准，存在一定规模的亏损。呼和浩特市地铁因线路数量、人口基数相对较少和站点选址上的问题，亏损较为严重，因此通过建立合理的数学模型分析地铁运营去情况，从而提出科学的运营方案，有效降低运营成本和提高运行效率势在必行。

### 2.1 问题 1 的分析

为提高地铁服务水平，需要对地铁列车发车间隔和车厢数量进行优化。问题 1 属于多目标规划问题，我们可以建立一个以乘客满意度和企业满意度加权平均值最大为总体目标的优化模型。其中乘客满意度为乘客候车满意度和车内拥挤程度的加权平均值。满意度可以通过隶属度函数，将乘客候车时间和车内人数转换而得。运营企业满意度则可有由运营企业的收益，即客票收入和运营成本之差转换而得。最后通过模型计算优化前后发车方案的满意度，进行对比分析，并给出优化后的发车方案和车厢数量。

### 2.2 问题 2 的分析

对于每一个城市而言，地铁建设与城市的规划都是相辅相成的，研究站点最优选址与盈利问题，可以最大化地铁系统建设对社会创造的价值，推动经济发展。问题 2 属于选址规划与多目标优化问题，对解决上述问题应将涉及到的多方利益因素共同作为条件进行考虑，并结合利用用户分布情况选择最适位置。基于以上原因，本文建立了双层规划模型并使用启发式迭代对模型进行求解，将多目标转化为单目标优化进行寻优并分析选出最佳结果。

### 2.3 问题 3 的分析

为缓解上下班时间的交通拥堵情况，需要制定合理的错峰出行方案。通过对地铁线路特点的分析，将每个站点抽象成交通影响模型的基本分析单元，分别建立出行量随时间分布模型和错峰上班的交通影响模型。利用 EXCEL 的数据透视分析功能分析客流量数据，假设某一职业通勤时间向后调整，利用模型求解错峰调整后各个站点的客流量变化情况，并用交通效益这一参数来验证该措施对缓解交通拥堵的效果。

## 2.4 问题 4 的分析

为实现公交地铁优势互补，共同支撑起城市交通的核心，需要经过地铁公交配套衔接规划。考虑轨道交通与常规公交空间上的衔接，我们可以首先从公交站点布局衔接开始，兼顾乘客的出行成本和企业的运营成本，建立总成本最低的社区公交站点布设模型，并基于该模型给出实例方案。

## 3、模型假设

- (1) 地铁行驶过程中速度为匀速；
- (2) 地铁每日运行成本固定；
- (3) 线路客流需求独立，不受相邻线路运行状况的影响；
- (4) 客流需求独立于发车频率，即不受发车频率的影响；
- (5) 错峰上班前后的居住特性、职业类别比例和选择的交通方式基本不变；
- (6) 以上班为例，错峰上班实施后，某行业上班时间向后推迟 30 分钟。

## 4、定义与符号说明

符号定义	符号说明
$L$	乘客能够接受的候车时间
$\lambda$	乘客到达率
$n$	地铁车厢数量
$C_e$	地铁建设成本
$C_p$	地铁运营成本
$C_v$	旅客成本
$Q_{(i,i+1)}$	$i$ 和 $i+1$ 站点之间的出行量
$Q_{S(i,i+1)}$	行业 $S$ 在 $i$ 和 $i+1$ 站点之间的出行量
$Q_{Z(i,i+1)}$	调整后行业 $S$ 在 $i$ 和 $i+1$ 站点之间的出行量
$k$	交通效益参数

## 5、模型的建立及求解

### 5.1 问题 1 的模型

#### 5.1.1 最优车厢数量及发车间隔确定模型的确定

##### 1. 目标函数一：乘客候车满意度

乘客候车都有一定的耐受度，当超出一定的候车时间乘客就表现出不耐烦会对候车时间过长表示不满。一般情况下乘客候车的耐受度依时段不同而不同。比如早高峰时段由于多数出行的目的为通勤、通学。因此能够接受的候车时间就要比其它时段短一些。乘客候车满意度一般以候车时间长短来衡量。候车时间越长则满意度越低。但这必须考察每一位乘客的候车时间致使计算过于烦杂。为简化模型这里满意度近似以满意率（即满意人数占总乘客人数的比例）表示<sup>[1]</sup>。所谓满意人数就是候车时间小于某一定值的乘客数。当车辆到达时如果候车人数超过耐受时间长度内到达的乘客数候车者中肯定存在候车时间超时者。这一部分人数等于该站候车总人数减去耐受时间长度内到达的乘客数。考虑到不是每位乘客总能乘上到站后的第一列车甚至有的乘客因为拥挤等原因要连续等上若干列车才能上车这时还应扣除重复计数的乘客数。因此第  $j$  车在  $i$  站对应的超时乘客数  $u_{ij}$  分三种情况计算：

（1）第  $j$  辆车到达  $i$  站时候车者中未有超时者时即当  $P_{ij} - \int_{t_{ij}-L}^{t_{ij}} \lambda_i(t) dt \leq 0$  时：

$$u_{ij} = 0 \quad (5-1)$$

式中， $P_{ij}$  为第  $j$  辆车到达  $i$  站时候车的乘客数； $\lambda_i(t)$  为  $t$  时刻乘客到达率； $t_{ij}$  为第  $j$  辆车到达  $i$  站的时刻。

（2）第  $j$  辆车到达  $i$  站时候车者中虽有超时者但第  $j-1$  辆车开出  $i$  站时车站无超时者时，即当  $P_{ij} - \int_{t_{ij}-L}^{t_{ij}} \lambda_i(t) dt \leq 0$  且  $P_{ij-1} - \int_{t_{ij-1}-L}^{t_{ij-1}} \lambda_i(t) dt - B_{ij-1} \leq 0$  时：

$$u_{ij} = P_{ij} - \int_{t_{ij}-L}^{t_{ij-1}} \lambda_i(t) dt \quad (5-2)$$

式中， $B_{ij}$  为第  $j$  辆车在  $i$  站上车的乘客数。

（3）第  $j$  辆车到达  $i$  站时候车超时者中含有第  $j-1$  辆车到达时超时但未能上车者即当  $P_{ij} - \int_{t_{ij}-L}^{t_{ij}} \lambda_i(t) dt > 0$  且  $P_{ij-1} - \int_{t_{ij-1}-L}^{t_{ij-1}} \lambda_i(t) dt - B_{ij-1} > 0$  时，

$$u_{ij} = P_{ij} - \int_{t_{ij-1}}^{t_{ij}} \lambda_i(t) dt - (P_{ij-1} - \int_{t_{ij-1}-L}^{t_{ij-1}-1} \lambda_i(t) dt - B_{ij-1}) \quad (5-3)$$

上述各式中：

$$P_{ij} = P_{ij-1} + \int_{t_{ij-1}}^{t_{ij}} \lambda_i(t) dt - B_{ij-1} \quad (5-4)$$

其中：

$$B_{ij-1} = \begin{cases} p'_{ij-1} & q_{ij-1} \geq p'_{ij-1} \\ C_{\max} - q_{ij-1} & \text{其他} \end{cases} \quad (5-5)$$

式中：

$$q_{ij-1} = C_{\max} - (V_{ij-1} - V_{ij-1} a(t_{ij-1})) \quad (5-6)$$

$$p'_{ij-1} = p_{ij-1} + \int_{t_{ij-1}}^{t'_{ij}} \lambda_i(t) dt \quad (5-7)$$

$$t'_{ij-1} = t_{ij-1} + \beta \cdot B_{ij-1} \quad (5-8)$$

式中， $V_{ij}$  为在  $i$  站至  $i+1$  站区间内第  $j$  辆车上的乘客数； $C_{\max}$  为列车最大载客量； $t'_{ij}$  为第  $j$  辆车在  $i$  站的发车时刻。

以上计算公式具有传递性，可在给定初始状态的情况下，逐车逐站计算乘客候车不满意人数。最后乘客候车满意度目标函数表示为：

$$x_w = \frac{\sum_{i=1}^m \int_{T_1}^{T_2} \lambda_i(t) dt - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^m \int_{T_1}^{T_2} \lambda_i(t) dt} \quad (5-9)$$

## 2. 目标函数二：乘客坐车舒适度

乘客坐车舒适度主要体现在车内乘客的密度，可以采用隶属度函数来表示。不妨假设当乘客有座位时，满意隶属度为“1”；乘客站立时，满意隶属度则随着车内拥挤程度的增加而减小<sup>[2]</sup>。因此，站立者满意隶属度可用下述函数  $\mu(x)$  表示：

$$\mu(x) = \begin{cases} k_0 & 0 < V_{ij} - s < r_0 \\ \frac{C_{\max} - s - x}{C_{\max} - s - r_0} k_0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5-10)$$

式中： $x$  为车内站立人数； $k_0$  为车内不感觉拥挤时，乘客站立者满意的隶属度值； $s$  为车厢内座位数； $r_0$  为车内不感觉到拥挤的站立人数临界值。

此时第  $j$  辆从  $i$  站至  $i+1$  站区间内乘客坐车舒适度总值可用下式表示：

$$v_{ij} = \begin{cases} V_{ij} & V_{ij} - s \leq 0 \\ s + (V_{ij} - s) \mu(V_{ij} - s) & \text{其他} \end{cases} \quad (5-11)$$

最后，乘客坐车舒适度目标函数表示为：

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} v_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} V_{ij}} \quad (5-12)$$

### 3. 目标函数三：地铁运营部门满意度

一般情况下，每发一列车运营企业都有一个收益的最低期望值。当收入低于该值时，企业会感到不满意；当收入超出某一值时，企业会感到非常满意。因此，关于企业对收益的满意程度可采用升“半梯形分布”隶属度函数确定<sup>[3]</sup>：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < b_1 \\ \frac{x - b_1}{b_2 - b_1} & 0 \leq x < b_1 \\ 1 & x > b_2 \end{cases} \quad (5-13)$$

式中， $x$  为客票收入； $b_1$  为地铁部门对客票收入的最低期望值； $b_2$  为地铁部门对客票收入的期望值。

则地铁部门满意度可由下式计算：

$$x_e = \frac{\sum_{j=1}^n \mu \left( \sum_{i=1}^{m-1} (B_{ij} \cdot \rho) \right)}{n} \quad (5-14)$$

### 4. 约束条件

为保证城市轨道交通线路能够安全运营，目标约束主要有：

约束条件 1：列车实际载客数不能超过列车最大载客量  $C_{\max}$ 。列车的实际载客量如果超过列车的最大载客量，列车将很容易发生刹车失灵等交通事故。因此，为保证行车安全应要求列车实际载客量不能超过列车最大载客量。

约束条件 2：由于地铁站台修建规格固定，最大的车厢数量具有一定限制，列车长度不能超过地铁站台长度，同时为了具有一定的载客量，列车长度也不能过小，地铁车厢数量的约束条件表示如下：

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (5-15)$$

约束条件 3：列车发车间隔不能过小也不能过大。若列车发车间隔过小，两车之间很容易发生追尾事件；若列车发车间隔过大，可能导致车站等候人数超出车站站台的容



纳能力，使行人行动不便，严重时可能发生踩踏事件<sup>[4]</sup>。因此，为保证行人和列车行驶安全应要求发车间隔不能过大或过小。可如下表示约束条件：

$$\max \lambda_{ij} h_j \leq C_{\max} \quad (5-16)$$

$$h_{\min} \leq h_j \leq h_{\max} \quad (5-17)$$

式中， $\lambda_{ij}$  为  $i$  时刻  $j$  站点的到达率， $h_j$  为第  $j$  个时间段的发车间隔， $h_{\min}$ 、 $h_{\max}$  分别为最小发车间隔时间和最大发车间隔时间。

## 5. 多目标单一化

如上所述，模型的建立应兼顾乘客和运营企业的利益。因此，规划目标为乘客候车满意度、乘客坐车舒适度和运营企业满意度加权平均值最大<sup>[5]</sup>。单一化后目标函数为：

$$\max z = w_1 x_w + w_2 x_c + w_3 x_e \quad (5-18)$$

### 5.1.2 最优车厢数量及发车间隔确定模型的求解

以附件一中 2020 年 9 月 5 日（周六）地铁 1 号线 1a 站点到 1t 站点的客流数据进行计算分析，当日客流数据如下表。

表 5-1 9 月 5 号 1 号线全日流量表

站点	进站人数	出站人数	站点	进站人数	出站人数
1a	4268	4401	1k	1773	1821
1b	2137	2360	1l	1136	1250
1c	2654	2717	1m	5958	6720
1d	2658	2857	1n	2387	2182
1e	2915	3528	1o	4963	3714
1f	4503	4461	1p	6422	5152
1g	2150	2250	1q	1321	1463
1h	1161	1218	1r	1273	1338
1i	1982	1890	1s	2125	2172
1j	1634	1503	1t	3104	3301

#### 1. 数据处理

线路首班车 6:00 发车，末班车 22:00 发车；根据客流大小周末运营过程可以分为 3 个时段，分别为：早高峰（9:00-11:00），晚高峰（16:00-18:00），平峰（6:00-9:00、11:00-16:00、18:00-22:00），据资料显示呼和浩特地铁单节车厢最大载客量为 400 人，假设乘客可接受的候车时间  $L$ ，其值在高峰时段为 3min，平峰时段为 6min；单节车厢内不感觉拥挤的站立人数临界值  $r_0 = 170$ ；当车厢内不感觉拥挤时，乘客站立者满意的隶属度值

$k_0 = 0.8$ 。预期平均票价收入定为 5 元/人次，运营部门开列单列车期望收入的临界值为 4880 元。权重取值  $w_1=0.4$ ,  $w_2=0.3$ ,  $w_3=0.3$ 。

乘客的到达率可以单独进行调查统计，也可以由全日客流的数据计算得出。上述线路的到达率见下表。

表 5-2 不同时段线路沿途站点乘客到达率

时段	6:00-9:00	9:00-11:00	11:00-16:00	16:00-18:00	18:00-22:00
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$
1a	20.70	12.81	20.83	7.68	9.10
1b	8.50	5.85	10.43	4.00	6.83
1c	10.28	6.83	13.5	5.31	8.30
1d	10.48	7.38	13.23	5.46	7.73
1e	9.18	8.21	14.76	6.93	9.48
1f	8.08	10.51	21.70	10.53	24.21
1g	4.75	4.73	10.98	5.25	10.11
1h	3.15	2.35	5.78	2.45	5.61
1i	3.55	4.41	14.51	4.56	5.98
1j	4.50	3.36	8.50	4.42	6.45
1k	4.26	4.08	9.78	4.43	6.98
1l	2.73	2.35	5.35	2.60	5.90
1m	3.30	3.11	27.13	20.55	45.2
1n	2.98	2.45	13.41	7.46	13.46
1o	4.78	4.68	34.01	20.18	19.05
1p	3.43	3.95	310.4	20.58	48.66
1q	3.46	2.78	5.90	3.11	6.75
1r	3.13	2.65	5.95	2.93	6.55
1s	3.41	2.91	10.28	6.50	12.30
1t	6.80	5.68	16.30	8.05	14.90

为了优化早高峰(9:00-11:00)，晚高峰(16:00-18:00)，平峰(6:00-9:00、11:00-16:00、18:00-22:00)等五个时间段的地铁 1 号线(车站数  $m=20$ )列车的发车间隔，将整个统计时间段划分为 5 个时间段，对应的发车间隔即决策变量设为  $h_1$  (9:00-11:00)、 $h_2$  (16:00-18:00)、 $h_3$  (6:00-9:00)、 $h_4$  (11:00-16:00)、 $h_5$  (18:00-22:00)，车厢数量其中列车运营商的利润率  $a=20\%$ 。进而用表 5-2 中的数据进行列车发车间隔优化模型的求解。

## 2. 目标函数—单独求解：乘客候车满意度最高

$$\max x_w = \frac{\sum_{i=1}^m \int_{T_1}^{T_2} \lambda_i(t) dt - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^m \int_{T_1}^{T_2} \lambda_i(t) dt} \quad (5-19)$$

$$s.t. \begin{cases} 52.58h_1 \leq 400 \\ 44.32h_2 \leq 400 \\ 32.31h_3 \leq 400 \\ 30.25h_4 \leq 400 \\ 29.62h_5 \leq 400 \\ 5 \leq h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 \leq 12 \\ 6 \leq n \leq 8 \end{cases} \quad (5-20)$$

其中，对  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$ 、 $h_5$ 、 $n$  取整。 $h_1$   $h_2$   $h_3$   $h_4$   $h_5$

利用 Lingo 软件（程序见附件）求得目标函数一在约束条件下的最优解为： $h_1=5$  分钟， $h_2=5$  分钟， $h_3=5$  分钟， $h_4=5$  分钟， $h_5=5$  分钟，即在全时段发车间隔均为 5 分钟、地铁车厢数量为 8 节时，乘客候车满意度最高。

### 3. 目标函数二单独求解：乘客坐车舒适度最高

$$\max x_c = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} v_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} V_{ij}} \quad (5-21)$$

利用 Lingo 软件（程序见附件）求得目标函数二在相同的约束条件下的最优解为： $h_1=5$  分钟， $h_2=5$  分钟， $h_3=5$  分钟， $h_4=5$  分钟， $h_5=5$  分钟， $n=8$  节，即在全时段发车间隔均为 5 分钟、地铁车厢数量为 8 节时，乘客乘车舒适度最高。

### 4. 目标函数三单独求解：地铁运营部门满意度最高

$$\max x_e = \frac{\sum_{j=1}^n \mu \left( \sum_{i=1}^{m-1} (B_{ij} \cdot \rho) \right)}{n} \quad (5-22)$$

利用 Lingo 软件（程序见附件）求得目标函数三在相同的约束条件下的最优解为： $h_1=8$  分钟， $h_2=10$  分钟， $h_3=12$  分钟， $h_4=12$  分钟， $h_5=12$  分钟， $n=6$  节，即在早高峰发车间隔为 8 分钟、晚高峰发车间隔为 10 分钟、平峰时段发车间隔为 12 分钟、地铁车厢数量为 6 节时，地铁运营部分满意度最高。

### 5. 单一化后目标函数求解结果

$$\max z = w_1 x_w + w_2 x_c + w_3 x_e \quad (5-23)$$

利用加权公式求得单一化后目标函数在相同的约束条件下的最优解（取整后）为： $h_1=6$  分钟， $h_2=6$  分钟， $h_3=7$  分钟， $h_4=7$  分钟， $h_5=7$  分钟， $n=7$  节，即在高峰时段发车间隔为

6 分钟、平峰时段发车间隔为 7 分钟、车厢数量为 7 节时，地铁运营各方面的综合满意度能达到最优。

### 5.1.3 目前发车方案合理性分析

当前发车方式为高峰发车间隔 6 分钟，平峰发车间隔 10 分钟，晚 20 点以后发车间隔 12 分钟的方案。首班车 6:00 发出，末班车 22:00 发出。仍选择 2020 年 9 月 5 日的数

据，将该地铁运行策略代入上述模型中进行求解，各方面满意度如下图所示。

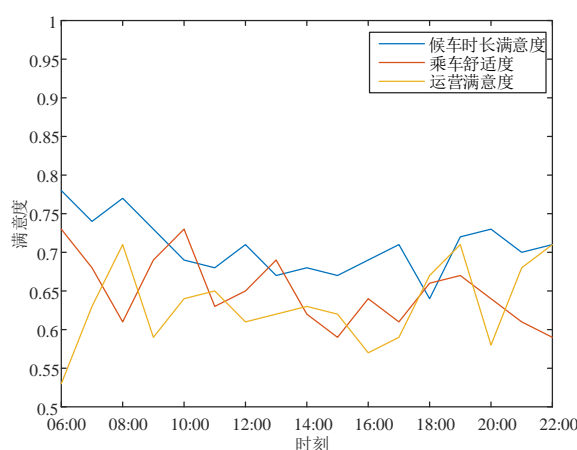


图 5-1 当前发车方案满意度

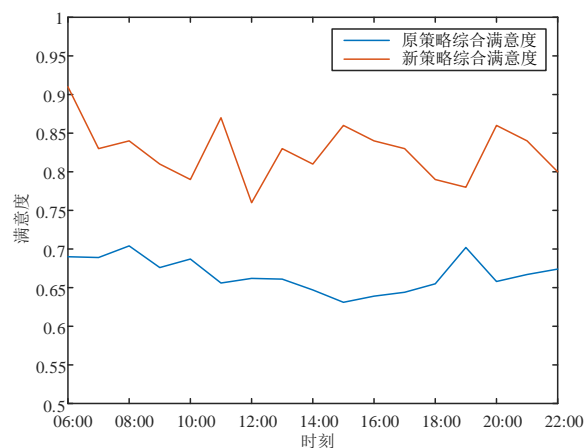


图 5-2 优化前后发车方案满意度

从图 5-1 和图 5-2 可以看出，在优化前的发车方案中，各方面的满意度均为较低水平，在运营部门营收满意度不高的情况下，乘客满意度也不高。而在优化后的发车方案中，综合满意度整体高于优化前的发车方案满意度，这说明目前发车方案不太合理，同时也证明了优化后的发车方案是行之有效的，提高了地铁运营部门和乘客的满意度。

## 5.2 问题 2 的模型

### 5.2.1 呼和浩特市现有地铁建设与城市情况分析

查阅地图与城市规划相关资料可知，呼和浩特市（以下简称“呼市”）的城市结构呈现东西长南北短的扁长形，由于受到北侧大青山的阻隔，外加新城区块建设地影响，呼市对未来城市发展提出了“北控、东优、南拓、西联”的发展方针，以向东、向南发展成为了城市发展的主要方向。

呼市的城市主要区块分布与地铁、主干道分布如图 5-3。作为呼市各大机关和主要公共建筑的核心走廊，新华大街成为了呼和浩特地铁一号线的线位，连接了城市东西城区与机场、车站，完成了城市东西交通动脉的搭建。地铁 1 号线不止步于新华大街沿线，

西部有向金川延伸的计划，而东部则预留了向东南延伸的计划，地铁一号线在城市开发中能贡献巨大的带动作用。

根据城市区块分布情况，地铁二号线选择了 C 型的南北半环形布局。二号线连接了呼和浩特站，并与一号线在在老城区里商业较为密集的新华广场站换乘。在北侧向东转向后覆盖了东部新城片区，南侧转向后连接了金桥开发区，为两个区域未来快速发展提供了便捷的轨道交通支持，便于乘客快速在市中心与周边新区之间进行通勤。

综合各种信息可以看出，呼市交通主干快速路与地铁线路建设尚未形成成型网络结构，大面积城区交通依然只能依靠普通道路，城市远距离快速通勤的问题对于诸如金川开发区、大学区等区域而言依然较为困难。且南北方向无贯穿城市的快速路，地铁尽在老城区穿过，对于东侧新城区南北通勤问题并无缓解效果。



图 5-3 呼和浩特城市区块与交通要道分布

图 5-4 为呼和浩特在售新建楼盘分布情况，结合本图与前文中的城市区块分布，可以看出城市东部片区发展迅速但缺少轨道交通网络对于城市通勤功能的支撑。因此本文认为建立一条城市东部片区贯穿南北的地铁线路对于促进城市交通网络的建设至关重要。同时考虑到换乘对于提升轨道交通利用效率的作用，对于新建线路的选取应尽量于原有线路产生交叉，构建换乘车站，提高整体地铁网络利用效果。

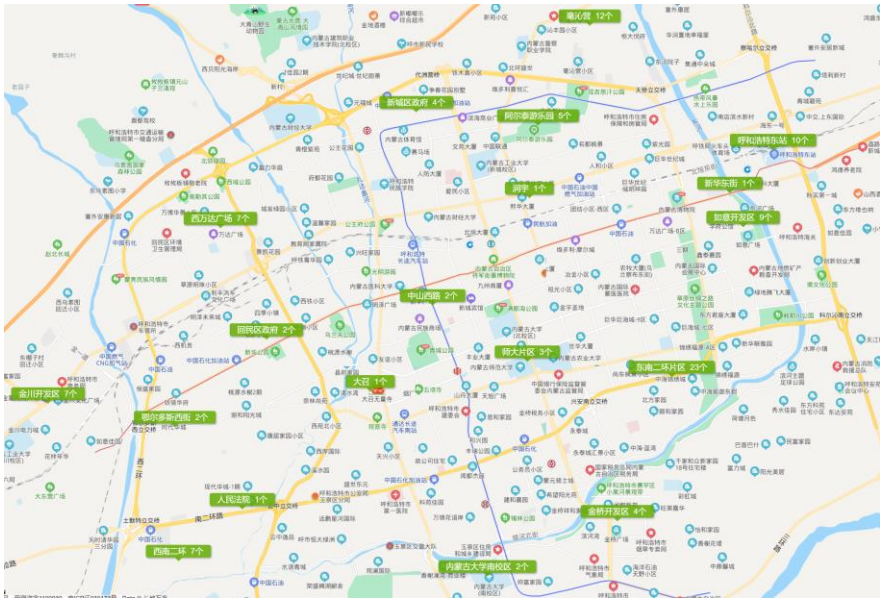


图 5-4 呼和浩特新建楼盘分布图

综上所述，本文将拟新建线路设定为由金桥开发区向东北方向穿过东南二环与大学片区，与新华大街垂直相交向北延伸至毫沁营区域，大致预选走向图如图 5-5 所示。经地图测量全程约 15 千米左右，相较于 1、2 号线减少了建设长度，起到了降低建设成本的作用。同时可与 1 号线于万达广场商圈，2 号线南北两段东西走向线路交会，形成三个换乘车站，提升换乘能力。

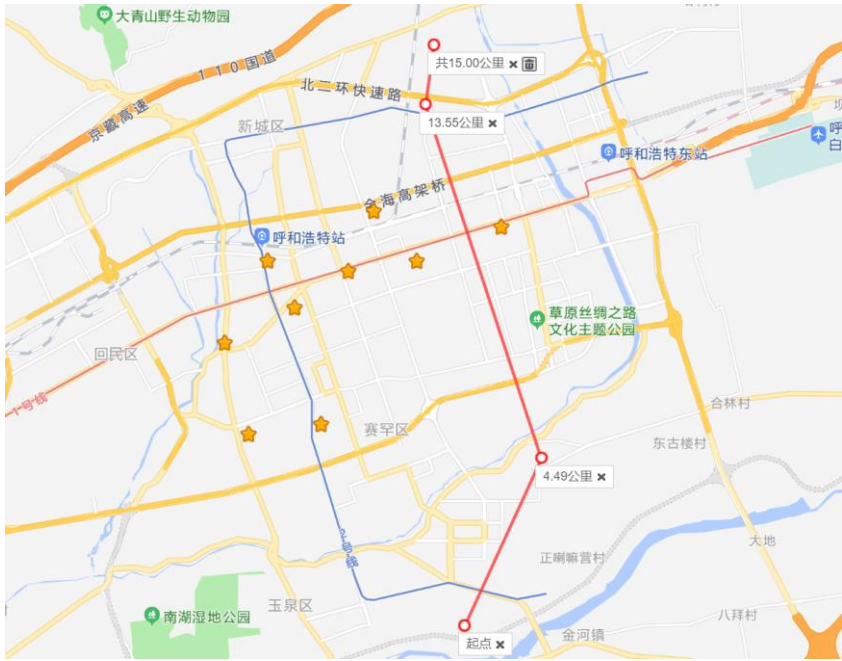


图 5-5 理论新建地铁预选线路走向图



如图 5-7 为 1 号线一日内进出站人数的折线图，可以看出，现有线路的站点利用率除了几个大站之外并不高。这导致了现有线路建设成本的提高与盈利能力的下降。因此对于新线路建设而言本文认为应该降低车站数量。

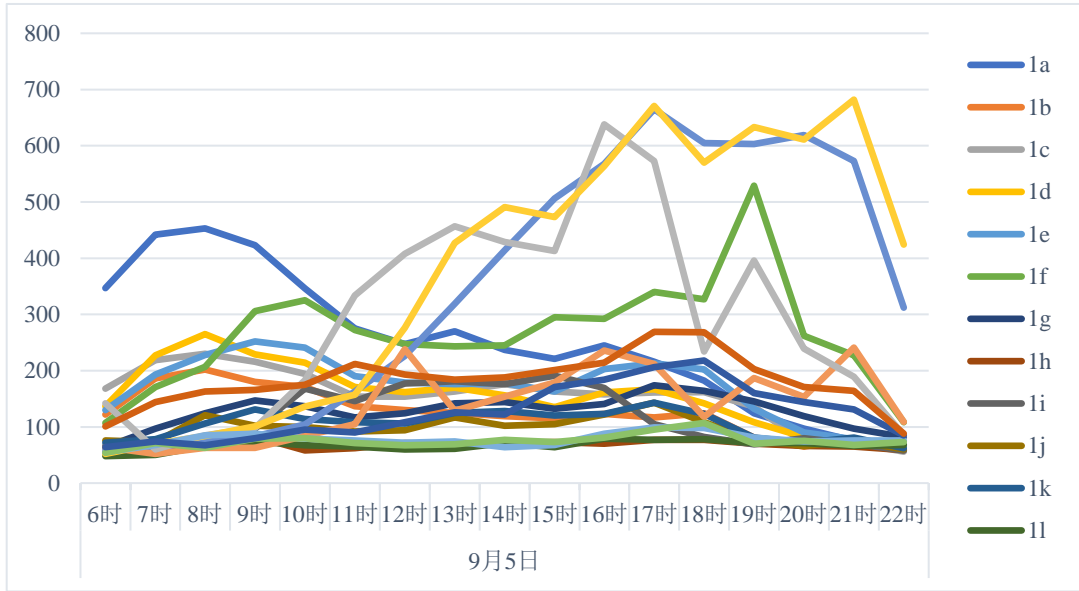


图 5-6 1 号线日内进出站人数图

## 5.2.2 站点选址与盈利模型的确定

地铁站点选址工作需要考虑众多因素，诸如：旅客便利性、地铁建设运营成本、政府城市规划等等。因此，对于地铁站点选址的分析应从不同角度将多种因素同时进行分析，从而实现乘客出行成本最小化，便利性最大化；地铁建设成本最小化，运量最大化；城市规划影响最小化，经济促进最大化<sup>[6]</sup>。为达成上述目标，本文利用了系统分析方法，通过双层规划方法构建了站点选址模型，并在考虑不同主体和实际情况的约束限制后完成站点选址工作。综上所述，实际的地铁站点优化是在有限的候选地铁站点中的选择，即采用 0—1 变量的形式，以实现社会效益最大化目标<sup>[7]</sup>。这是一个以社会利益为上层，出行者需求为下层的双层规划。

首先我们考虑以政府规划和地铁公司为主的上层规划工作。上层规划所追求的目标是达成社会利益的最大化，同时保证地铁公司的经济利益<sup>[8]</sup>。综上所述，本文将地铁建设成本  $C_e$ 、地铁运营成本  $C_p$ 、旅客成本  $C_v$  与地铁利用出行量作为模型的目标。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times H_{ij,m} \quad (5-24)$$

式中,  $H_{ij,m}$  为在第  $m$  个地铁站乘坐地铁, 由第  $i$  个区域出行到第  $j$  个出行区域的人数;  $y_m$  为一个 0-1 变量, 若选择到第  $m$  个站则  $y_m$  等于 1, 否则为 0。

将一条线路所设置的最少数量设为  $Q$ ,  $P_m$  为列车在第  $m$  座车站最大可承载旅客数。由上可建立上层目标规划模型:

$$\min C_e \quad (5-25)$$

$$\min C_p \quad (5-26)$$

$$\min C_v \quad (5-27)$$

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times H_{ij,m} \quad (5-28)$$

$$\sum_{m=1}^N y_m \geq Q \quad (5-29)$$

$$H_{ij,m} \leq P_m \quad (5-30)$$

下面对每种成本因素分别进行建模: 对于地铁站点的建设成本  $C_e$ , 我们可将其看作一个规则的长方体,  $l_0, w_0, h_0$  分别为站房的长、宽、高, 设  $c_e$  为单位空间建设成本

$$C_e = \sum_{m=1}^M l \times w \times h \times c_e \times y_m \quad (5-31)$$

对于地铁的运营成本, 本文将其划分为员工工资与运营支出  $C_{p1}$ 、运行电费  $C_{p2}$ 、车辆维护费  $C_{p3}$  三项进行研究。

$$C_{p1} = \sum_{m=1}^M n \times b \times y_m \quad (5-32)$$

$$C_{p2} = \sum \left[ l \times a \times E_p \times \beta_2 \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times H_{ij,m} + (1 + \lambda) \times \sum_{m=1}^M y_m \times E_p \times (C_a + C_r \times T_m) \right] \quad (5-33)$$

$$C_{p3} = \varepsilon + d \times \beta_1 \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times H_{ij,m} \quad (5-34)$$

式中,  $a$  为列车平均用电量;  $b$  为站员的人均工资;  $d$  为车辆修理单价;  $l$  为线路长度;  $n$  为平均每个站点员工人数;  $E_p$  为单位电价;  $C_a$ 、 $C_r$  分别为进出站时加减速电耗、停站电耗;  $T_m$  为第  $m$  站停车时间;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为比例系数;  $\varepsilon$  为随机数。

地铁出行者成本  $C_v$  为:

$$C_v = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N c_{ij,s,m} \times H_{ij,m} \quad (5-35)$$



式中,  $C_{ij,s,m}$  为从第  $i$  个节点第  $m$  个地铁站到达第  $j$  个节点的步行、候车、乘车等出行成本的总和。

通过将多目标函数进行处理, 本文将其转化为单目标优化问题进行处理。

$$\min C = \rho_1 \times C_p + \rho_2 \times C_v - \rho_3 \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times H_{ij,m} \quad (5-36)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 、分别为政府对各目标所设计的权重值。本文将建设运营成本、出行成本、出行量作为影响政府决策目标权重的三个准则<sup>[9]</sup>, 通过模糊熵建立模糊评价矩阵进行求解。

$$A = [a_1 \quad a_2 \quad a_3] \quad (5-37)$$

其中  $a_i$  表示政府对第  $i$  个准则的期望值, 对矩阵  $A$  标准化后可以得到:

$$b_i = \frac{a_i - \min\{a_i\}}{\max\{a_i\} - \min\{a_i\}} \quad (5-38)$$

$b_i$  为准则  $i$  的关键因子隶属度, 且  $b_i \in [0,1]$ 。

根据模糊熵原理, 可以建立模糊事件  $A$  的模糊熵模型:

$$H(i) = -t \sum_{i=1}^3 [b_i \ln b_i + (1-b_i)] \quad (5-39)$$

当  $b_i$  等于 0 时, 即可以计算出指标权重为:

$$\rho_i = \frac{1-H_i}{3 - \sum_{i=1}^3 H_i} \quad (5-40)$$

此后, 将视角聚焦于旅客自身对于出行方式的选择进行下层规划, 建立多出行方式的流量分配模型

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N y_m \times \int_0^{h_{ij,m}} c_{ij,s,m}(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_0^{q_{ij,b}} c_{ij,b}(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_0^{q_{ij,c}} c_{ij,c}(x) dx \quad (5-41)$$

$$c_{ij,s,m} = 2 \times y_m \times \lambda_s \times t_{im,s} + y_m \times \lambda_s \times t_{im,w} + t_{ij,m}(x) \times \lambda_s + p_{ij,m} \quad (5-42)$$

$$c_{ij,b}(x) = \lambda_b \times t_{ij} + \lambda_b \times t_{ij,w} + \lambda_b \times t_{ij,b}(x) + p_{ij,b} \quad (5-43)$$

$$c_{ij,c}(x) = \lambda_c \times t_{ij1} + \lambda_c \times t_{ij2}(x) \quad (5-44)$$

$$\sum_{m=1}^M h_{ij,m} + q_{ij,b} + q_{ij,c} = g_{ij} (i, j=1, 2, \dots, N) h_{ij,m} \geq 0, q_{ij,b} \geq 0, q_{ij,c} \geq 0 \quad (5-45)$$

式中,  $g_{ij}$  是一个定值, 为从  $i$  点到  $j$  点的出行量。

双层模型的求解流程如图 5-7:

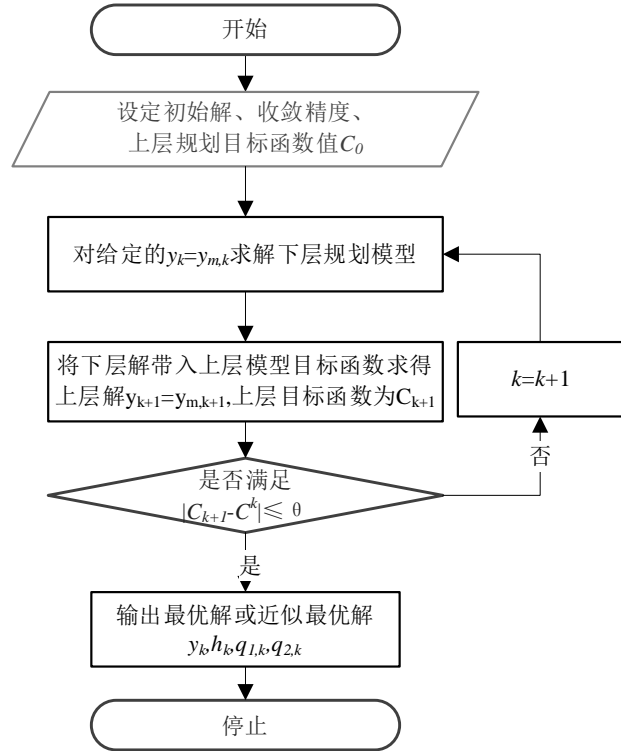


图 5-7 双层规划求解流程图

### 5.2.3 站点选址与盈利模型的求解

结合预选线路沿线信息，本文将此线路服务出行区域数  $N$  设为 300 并依次进行编号，每个区域都有独自の OD 出行特征，部分数据见表 5-3。根据现有城市规划、客流分布等情况，现预设站点数量等同于 1 号线  $M=20$ 。图 5-8 为初始预设站点规划方案，绿点为站点位置。

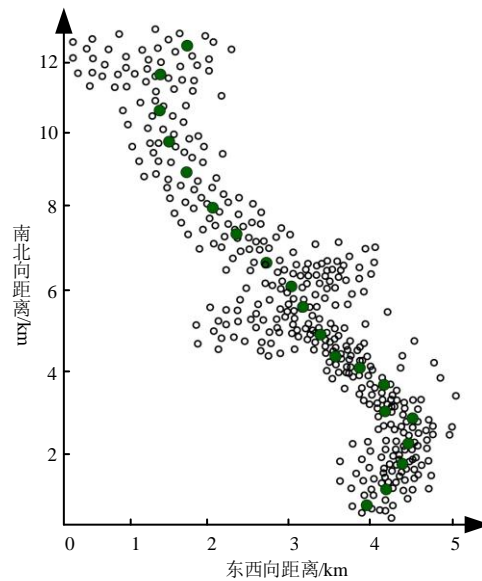


图 5-8 预设站点与周边区域分布图

表 5-3 部分出行区域出行量

出行区域	出行量/人/h
1	384
2	296
3	422
⋮	⋮
150	695
151	518
152	537
⋮	⋮
298	251
299	269
300	187

综合各种信息可设线路长  $l=15\text{km}$ ；车辆用电量  $a=30000\text{MW/年}$ ；单位电价  $E_p=1$  元  $/(\text{kw} \cdot \text{h})$ ；平均停车时间  $T_m=2\text{min}$ ；日均出行量 10.152 万人/日；地铁运营成本 43.85 万元/日；出行者出行成本 38.69 万元/日。将数据带入上层规划模糊熵计算公式可得  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  分别为 1.2；4.6；1.3。出行者不同方式出行成本如表 5-4。

表 5-4 部分出行区域出行量

出行方式	单位时间价值/元/h
地铁	15
公交	6
私家车	90

采用启发式算法进行迭代优化求解，经过迭代到下层目标函数值近似稳定时即可认为已收敛<sup>[5]</sup>，此时地铁站数量变为 13 个，具体位置如图 5-9 绿点位置所示。

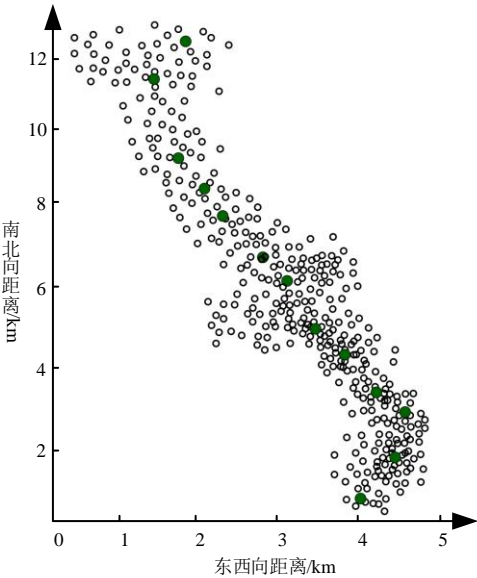


图 5-9 优化后站点与周边区域分布图

表 5-5 中对比了各项成本在优化前后的区别，由表可以看出，经过站位优化地铁的运营成本降低了 27.6%，出行者成本降低了 21.7%，客流量增加了 42.5%。充分实现了优化算法降成本，增客流的目标。

表 5-5 优化前后成本对比

出行方式	地铁运营成本/万元	出行成本/万元	地铁出行量/万人
原始方案	87.68	26.71	8.922
优化方案	63.48	20.91	12.711

经查询可知，现时呼和浩特地铁票价定价规则如表 5-6 所示。结合新设线路长度可得线路平均票价约为 3.43 元。因此经计算可知，每日客流量须达到 18.507 万人才能达到与地铁运营成本的收支平衡，乘客数量在此基础上进一步增加才有可能实现地铁线路的盈利。

表 5-6 呼和浩特地铁票价策略

乘坐里程/千米	票价/元
0-5	2
5-10	3
10-15	4
15-21	5
21-28	6
28 以上	每 10 千米增加 1 元

### 5.2.4 结果

针对问题 2 所提出的问题，本文首先结合所给附件资料和网络相关信息对呼和浩特市的城市实际规划与交通情况进行了分析，粗略确定了规划新建地铁线路的方向与位置。采用双层规划模型将地铁站点选择问题与政府、地铁公司、乘客各方利益与成本因素协同考虑，并使用启发式算法对预设初始条件进行优化，将预设的 20 个站点优化为 13 个，在降低了成本的同时也提高了乘客的利用率。结合地铁定价策略与实际运营成本等条件，计算得出了线路日利用量 18.507 万人的盈利利用人数线，为未来地铁发展规划提供了参考。

### 5.3 问题 3 的模型

弹性工作制由德国的经济学家提出，主要是为了解决职工上下班交通拥挤的困难。弹性工作制主要包括三种形式，第一种是核心时间与弹性时间结合制，即一天的工作时间由核心工作时间和环绕两头的弹性工作时间所组成，职工可以选择保证核心工作时间的几种上下班方案，例如上班时间为 7:30、8:00 和 9:00，下班时间则为 4:00、4:30 和

5:00; 第二种是紧缩工作时间制, 即职工可以在一个星期内工作的天数较少, 但每天工作的时间较长, 如每天 10h, 每周工作 4d, 或者每天工作 9h, 每两周多休息 1d; 第三种是错峰上下班, 为了降低职工同时到达和同时离开的数量, 规定不同类别的职工的上下班时间, 和第一种方案相似, 但不同的是职工上下班时间是确定的。前两种方案由于上下班时间的活动空间较大, 交通在时间上分配的随机性较强, 因此在实施前不易评价<sup>[10]</sup>。而第三种方案在我国的基本国情下, 其应用可以得到进一步的扩展, 通过调整城市各行业的工作时序, 使部分行业的上下班时间错开, 达到缓解交通阻塞的目的<sup>[11]</sup>。但由于不同城市自身的特点, 本文通过建立错峰出行对交通影响的模型, 结合呼和浩特各个站点的周边环境, 提出合理的错峰出行计划。

### 5.3.1 错峰出行交通影响模型的确定

分析某两个相邻站点之间的单向出行总量在时间上的分布, 在出行总量不变的前提下, 对某类人群的上学、上班时间进行调整, 调整后城市各站点之间的出行量随时间重新分布, 比较错峰上班实施前后的出行分布变化, 称为交通影响模型<sup>[12]</sup>。

根据地铁站点的选址, 将每个站点抽象成单元, 如图 5-10 所示。本文以任意两个相邻站点之间的交通量作为分析对象。

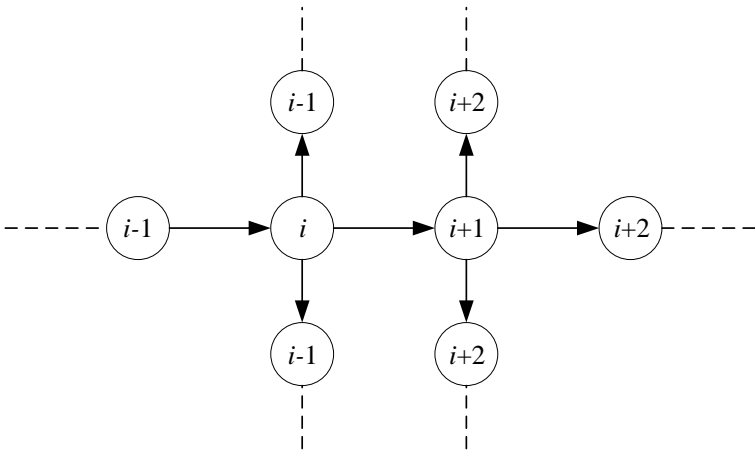


图 5-10 交通影响模型的基本分析单元图

模型的假设应当满足:

- (1) 错峰上班前后的居住特性、职业类别比例和选择的交通方式基本不变;
- (2) 以上班为例, 原统一上班时间为 8:00, 错峰上班实施后, 某行业上班时间调整为 8:30;

(3) 大部分通勤、通学出行者完成出行跨越的站点  $N \leq 4$ ；假设 70% 或 80% 以上的通勤、通学者完成出行跨越的小区数不超过  $N$ ， $N$  的数值大小据城市规模与实际的调查数据确定。

### 1. 出行量随时间分布模型

相邻两站点  $i$  和  $i+1$  之间的出行总量包括两部分，其一是它们之间的出行量，其二是满足途经这两个站点和跨越站点数不大于  $N$  的起讫出行量。根据模型的假设条件，上班时间调整前，大部分通勤、通学出行者选择的离家时间范围为：6:00~6:30，6:30~7:00，7:00~7:30，7:30~8:00，某行业上班时间调整后，该行业通勤、通学出行者选择的离家时间范围为 6:30~7:00，7:00~7:30，7:30~8:00，8:00~8:30。那么调整后所有的离家时间范围为 6:00~6:30，6:30~7:00，7:00~7:30，7:30~8:00，8:00~8:30。在 7:30~8:00 时间段内，站点  $i$  和站点  $i+1$  之间的出行量  $Q_{(i, i+1)}$  为：

$$\sum_{7:30}^{8:00} Q_{(i, i+1)} = Q_{(i-3, i+1)} + Q_{(i-2, i+1)} + Q_{(i-1, i+1)} + Q_{(i, i+1)} \quad (5-46)$$

在  $Q_{(i+j, j+k)}$  中， $j$  和  $k$  都代表以  $i$  站点为中心，相隔第  $j$  个站点和第  $k$  个站点，负值表示  $i$  站点左边的站点，正值表示右边的站点。在 7:00~7:30 时间段内，站点  $i$  和站点  $i+1$  之间的出行量为：

$$\sum_{7:00}^{7:30} Q_{(i, i+1)} = Q_{(i-2, i+2)} + Q_{(i-1, i+2)} + Q_{(i, i+2)} \quad (5-47)$$

在 6:30~7:00 时间段内，站点  $i$  和站点  $i+1$  之间的出行量为：

$$\sum_{6:30}^{7:00} Q_{(i, i+1)} = Q_{(i-1, i+3)} + Q_{(i, i+3)} \quad (5-48)$$

在 6:00~6:30 时间段内，站点  $i$  和站点  $i+1$  之间的出行量为：

$$\sum_{6:00}^{6:30} Q_{(i, i+1)} = Q_{(i, i+4)} \quad (5-49)$$

拟定方案对城市的  $S$  行业上班时间调整， $i$  站点  $S$  行业出行者的比例为  $P_i$ ，到达  $j$  站点  $S$  行业出行者的比例为  $P(i, j)$ ，则此类行业从事者在不同时间段的出行量  $Q_{S(i, i+1)}$  为：

8:00~8:30 时间段，

$$\begin{aligned} \sum_{8:00}^{8:30} Q_{S(i, i+1)} &= P(i-3, i+1)Q_{(i-3, i+1)} + P(i-2, i+1)Q_{(i-2, i+1)} \\ &\quad + P_{(i-1, i+1)}Q_{(i-1, i+1)} + P_{(i, i+1)}Q_{(i, i+1)} \end{aligned} \quad (5-50)$$

7:30~8:00 时间段,

$$\sum_{7:30}^{8:00} Q_{s(i,i+1)} = P_{(i-2,i+2)} Q_{(i-2,i+2)} + P_{(i-1,i+2)} Q_{(i-1,i+2)} + P_{(i,i+2)} Q_{(i,i+2)} \quad (5-51)$$

7:00~7:30 时间段,

$$\sum_{7:00}^{7:30} Q_{s(i,i+1)} = P_{(i-1,i+3)} Q_{(i-1,i+3)} + P_{(i,i+3)} Q_{(i,i+3)} \quad (5-52)$$

6:30~7:00 时间段,

$$\sum_{6:30}^{7:00} Q_{s(i,i+1)} = P_{(i,i+4)} Q_{(i,i+4)} \quad (5-53)$$

上班时间调整后, 站点  $i$  和站点  $i+1$  之间总的出行量  $Q_{Z(i, i+1)}$  为:

8:00~8:30 时间段,

$$\sum_{8:00}^{8:30} Q_{z(i,i+1)} = \sum_{8:00}^{8:30} Q_{s(i,i+1)} \quad (5-54)$$

7:30~8:00 时间段,

$$\sum_{7:30}^{8:00} Q_{z(i,i+1)} = \sum_{7:30}^{8:00} Q_{(i,i+1)} - \sum_{8:00}^{8:30} Q_{s(i,i+1)} + \sum_{7:30}^{8:00} Q_{s(i,i+1)} \quad (5-55)$$

7:00~7:30 时间段,

$$\sum_{7:00}^{7:30} Q_{z(i,i+1)} = \sum_{7:00}^{7:30} Q_{(i,i+1)} - \sum_{7:30}^{8:00} Q_{s(i,i+1)} + \sum_{7:00}^{7:30} Q_{s(i,i+1)} \quad (5-56)$$

6:30~7:00 时间段,

$$\sum_{6:30}^{7:00} Q_{z(i,i+1)} = \sum_{6:30}^{7:00} Q_{(i,i+1)} - \sum_{7:00}^{7:30} Q_{s(i,i+1)} + \sum_{6:30}^{7:00} Q_{s(i,i+1)} \quad (5-57)$$

6:00~6:30 时间段,

$$\sum_{6:00}^{6:30} Q_{z(i,i+1)} = \sum_{6:00}^{6:30} Q_{(i,i+1)} - \sum_{6:30}^{7:00} Q_{s(i,i+1)} + \sum_{6:00}^{6:30} Q_{s(i,i+1)} \quad (5-58)$$

## 2. 错峰上班的交通影响模型

S 行业上班时间调整后, 交通量在时间上的分布范围变大, 6:00~6:30 时段内的交通量变少, 而 8:00~8:30 的交通量增加, 对于它们之间区段的交通量变化情况则不确定, 因而重点分析 6:30~8:00 时段, 错峰上班实施前后交通量的变化是验证该措施缓解交通拥堵效果的重要依据。

7:30~8:00 时间段,

$$1 - \left\{ \sum_{7:30}^{8:00} Q_{Z(i,i+1)} / \sum_{8:00}^{8:30} Q(i,i+1) \right\} = k_{7:30 \sim 8:00} \quad (5-59)$$

7:00~7:30 时间段,

$$1 - \left\{ \sum_{7:00}^{7:30} Q_{Z(i,i+1)} / \sum_{7:00}^{7:30} Q(i,i+1) \right\} = k_{7:00 \sim 7:30} \quad (5-60)$$

6:30~7:00 时间段,

$$1 - \left\{ \sum_{6:30}^{7:00} Q_{Z(i,i+1)} / \sum_{6:30}^{7:00} Q(i,i+1) \right\} = k_{6:30 \sim 7:00} \quad (5-61)$$

$k_{7:30 \sim 8:00}$  代表 7:30~8:00 时间段  $i$  和  $i+1$  站点之间交通量降低的比例即错峰上班的交通效益参数。

### 5.3.2 错峰出行交通影响模型的求解

利用 Excel 的数据透视功能分析已有的数据, 选择其中一个工作日 (9 月 2 日, 星期三) 绘制出工作日各站出站客流量走势图 (如图 5-6)。

为了方便比较各个时段总的客流量变化, 将各站不同时段客流量汇总如图 5-11, 考虑到乌兰夫纪念馆、内蒙古展览馆、内蒙古博物院、呼和浩特东站等处客流量含有很多非上班上学人群, 因此这几个站点的人数未统计到汇总图中。

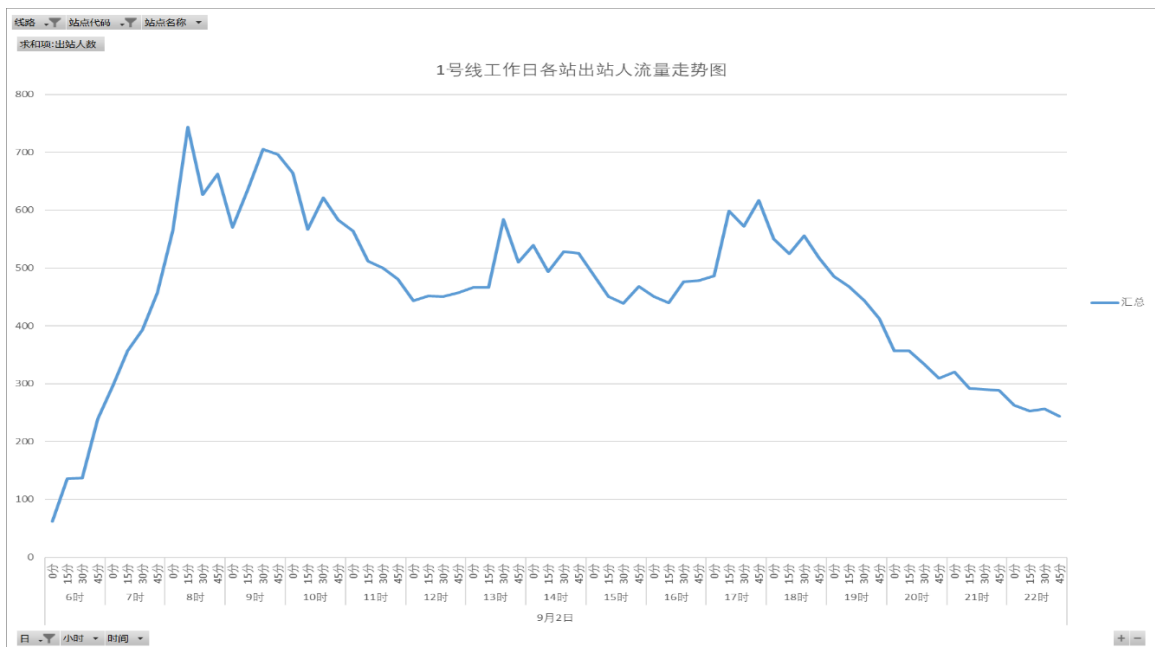


图 5-11 1 号线工作日出站客流量走势图



表格表 5-7 和表 5-8 分别为 1 号线出站各站部分时段出站人数和 1 号线调整前 8:00～9:00 和 8:30～9:30 出行人流量。分析可知，8:30～9:30 的客流量比 8:00～9:00 的流量明显降低，具备错峰上班的削峰填谷特征。

表 5-7 1 号线出站各站部分时段出站人数

编号	8 时				9 时			
	0 分	15 分	30 分	45 分	0 分	15 分	30 分	45 分
1a	114	54	51	56	58	54	63	63
1b	34	72	28	30	29	28	30	26
1c	30	24	37	33	31	38	38	40
1d	26	161	30	34	34	28	39	37
1e	44	43	51	61	46	45	57	55
1h	17	18	22	17	19	15	18	17
1i	36	44	49	45	39	43	55	53
1j	21	51	28	24	22	20	25	22
1k	25	37	40	40	36	33	39	25
1l	17	20	23	27	29	26	24	21
1o	59	76	77	92	52	124	135	149
1q	26	26	23	27	21	24	26	28
1r	22	18	26	32	25	24	28	30
1s	53	39	55	64	63	62	61	60
1t	42	61	87	80	66	73	67	70

表 5-8 1 号线调整前 8:00～9:00 和 8:30～9:30 出行人流量表

编号	1a	1b	1c	1d	1e	1h	1i	1j	1k	1l	1o	1q	1r	1s	1t
8:00-9:00	275	164	124	251	199	74	174	124	142	87	304	102	98	211	270
8:30-9:30	219	115	139	126	203	73	176	94	149	105	345	95	107	244	306
差值	56	49	-15	125	-4	1	-2	30	-7	-18	-41	7	-9	-33	-36

假设调整某职业类别，已知站点附近居民主要的职业类别比例，如表 5-9 所示。

表 5-9 站点周边职业类别比例

站点	1a	1b	1c	1d	1e	1h	1i	1j	1k	1l	1o	1q	1r	1s	1t
某职业类别比例%	9	7	8	11	10	6	8	7	5	6	4	6	7	5	6
其他职业类别比例%	91	93	92	89	90	94	92	93	95	94	96	94	93	95	94

5.3.3 结果

该职业类别的上班时间由 8:00 推迟到 8:30，根据错峰上班交通影响模型，得出调整后 8:00～9:00 的出行客流量，将其与原 8:00～9:00 的出行客流量相对比，如表 5-10 所示。

表 5-10 1 号线调整后 8:00~9:00 出行人流量对比表

编号	调整前 8:00-9:00	调整后 8:00-9:00	差值	效益 $k\%$
1a	275	273.74	-6.3	2.3
1b	164	163.93	-0.35	0.2
1c	124	122.64	-6.8	5.5
1d	251	249.9	-5.5	2.2
1e	199	196.6	-12	6.05
1h	74	73.22	-3.9	5.25
1i	174	170.08	-19.6	11.25
1j	124	123.37	-3.15	2.55
1k	142	141.05	-4.75	3.35
1l	87	85.98	-5.1	5.85
1o	304	299.72	-21.4	7.05
1q	102	101.82	-0.9	0.9
1r	98	96.6	-7	7.15
1s	211	208.25	-13.75	6.5
1t	270	265.14	-24.3	9

从表 5-10 分析可知，实施上班时间调整后，所有站点的流量都是正效益，求得平均交通效益为  $\bar{k}=5\%$ ，可见错峰调整后，对地铁站内高峰期的客流量有一定的缓解。

由此可知，采用错峰上班上学对地铁交通拥挤有一定的缓解作用，所以对于政府公务员、市级机关、商厦职员的工作可以将其推迟到 9:00 以后，下班时间也对应向后延长以保证整体工作时长不变。同理可以将学生的上学时间适当向前调整以避免早高峰时间。

## 5.4 问题 4 的模型

### 5.4.1 公交站点选址影响因素

#### 1. 公交站点服务范围内的用地布局

公交站点服务范围内的用地布局制约着出行发生源的数量及居民出行的性质，即影响着出行者选择公交出行方式的概率和选择公交出行乘客的数量。用地布局即是公交站点服务范围内的土地的利用性质。土地布局包括居住区用地、公共设施用地（包括行政、经济、文化、教育、卫生、体育以及科研设计等机构和设施用地）、工业产业区用地（工矿企业的生产车间、库房及其附属设施）、道路广场用地等<sup>[13]</sup>。

#### 2. 换乘乘客到达公交站点的出行距离

对于换乘者来说，通常如果选择公交换乘时，距离最短、出行时间最短，费用最低是主要考虑因素。因此，应该使换乘乘客到达公交站点的总成本最低，最基本的就是减少换乘乘客至公交站的步行距离。减少乘客换乘的步行距离能有效增加公共交通的吸引

力, 也增加了乘客选择常规公交的概率, 若距离较长, 乘客可能就会放弃公交方式出行[14]。

### 3. 公交站设置位置

当轨道交通建设完成投入运营后, 轨道交通站成为新的出行发生源和吸引源, 因此站点选择是应该考虑轨道站的换乘出行需求<sup>[14]</sup>。交叉口是各方向人流汇集和分散的节点, 公交站点靠近交叉口, 方便乘客的乘坐和换乘。从这一点来看, 公交站点布设在交叉口附近较在路段上能吸引更多的乘客, 方便乘客的集散。

## 5.4.2 公交线路选址模型的建立

公交站点选址问题就是将一定数量的公交站点分配给公交需求点, 使得整个公交系统和公交乘客总出行成本最低。在研究区域创建一个二维空间中的欧式坐标系  $\delta$ , 在欧式坐标系中, 按照地理空间的相对位置标注公交需求点和公交备选站点。公交需求点  $i(i=1,2,\dots,k)$  在欧式坐标中的相对坐标为  $(x_i, y_i)$ ; 公交备选站点  $j(j=1,2,\dots,m)$  在欧式坐标中的相对坐标为  $(x_j, y_j)$ 。定义集合表示在定义的欧式空间中从需求点  $i$  到备选点  $j$  的路径集合<sup>[15]</sup>。

因此, 建立公交站点选址的数学模型为:

$$\min(z) = \sum_i \sum_j k_i f_{ij}^c(x, y) Y_{ij} \quad (5-62)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1} X_j' = N \quad (5-63)$$

式中, 为公交需求点  $i$  的权重系数, 即公交系统对总成本的影响因素的权重;  $N$  为公交站点总数; 为公交备选站点  $j$  选为最后的公交站点, 则其值为 1, 反之为 0; 为公交需求点  $i$  分配给站点  $j$  时, 其值为 1, 反之为 0; 为欧式空间中从需求点  $i$  到备选点  $j$  的路径集合中的一条路径。

## 5.4.3 模型的参数

### 1. 乘客成本的度量函数 $f_{ij}^c(x, y)$

模型中  $f_{ij}^c(x, y)$  为可变子函数, 即度量函数, 表示公交需求点  $i$  选取公交备选站点  $j$  为乘坐公交的站点前提下, 乘客从  $i$  到达  $j$  的路径为  $c$ , 生成的出行成本<sup>[16]</sup>。度量函数可以是空间距离函数、费用函数、出行时间函数, 也可以是用户自定义的函数。

本文公交站点选址模型中的公交乘客出行成本的度量函数，是以公交乘客出行距离，即各个公交需求点与其最近的公交备选站点之间的加权总欧式距离最短为目标。假设任何两点位移距离是连续的，公交需求点为  $X_i(x_i, y_i)$  和公交备选站点  $X_j(x_j, y_j)$ ，则度量函数  $f_{ij}^c(x, y)$  为：

$$f_{ij}^c(x, y) = \varepsilon \alpha \beta \gamma \|X_i - X_j\| = \varepsilon \alpha \beta \gamma \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5-64)$$

式中， $\varepsilon$  为距离修正系数，对居民从换乘枢纽站形心到达公交站点的出行距离进行修正，将其转化为直线的欧氏距离； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为时间修正系数、费用修正系数和其他修正系数，对居民从换乘枢纽站形心到达公交站点的出行时间、出行费用、出行的安全性等影响因素进行修正，将其转化为空间上的欧氏距离，且  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma \geq 1$ 。

## 2. 公交系统对总成本的影响因素的权重系数 $k_i$

模型中权重系数  $k_i$  表示的是公交系统客观因素的成本权重，即为公交站点的选址影响因素对公交系统成本产生的影响权重。因此，分别对公交站点选址的影响因素进行量化，量化值如下表：

表 5-11 乘客换成步行距离量化表

乘客步行距离	<500m	500-600m	600-800m	800-1000m	>1000m
量化值	1	2	3	4	5

表 5-12 公交站点的布设位置

道路条件	交叉口		路段
	出道口	进道口	
量化值	1	2	3

## 5.4.4 模型的求解

通过新增地铁站点与常规公交站点之间线路，将轨道站点接入全市公共交通线路网络和二环快速路。轨道站点的近端区域通过新增公交线路，形成以轨道站点为中心的微循环线。



图 5-12 呼和浩特快速线与地铁线路

由上图可知，1 号线与 2 号线在快速线形成的环内纵横交错，本文以新华广场为中心枢纽，本文新增成“吉思汗公园站—公主府站”公交环线、“内蒙古体育馆站—东影路站”公交环线、“乌兰夫纪念馆—大学西街站”公交环线、“呼和浩特站—附属医院站—诺和木勒站—东影站”公交环线、“水上公园—内蒙古展览馆站”公交环线等，建立轨道站点与周边区域的联系。

轨道站点的远端区域通过新增或优化现有公交干线、长线，接驳较远的区域。本文新增“阿尔山路站”附近公交、“喇嘛营站”附近公交、“帅家营站”附近公交、“内大南校区站”附近公交、“锡林公园站”附近公交、“白塔西站”附近公交、“什兰岱站”附近公交。

同时新增若干地铁站与快速路公交站点间线路，本文新增公交路线有：“阿尔山路站—兴安南路站”、“帅家营站—锡林郭勒路站”、“内大南校区站—养鱼池西巷站”、“诺和木勒站—养鱼池西巷站”、“伊利健康谷站—云中路站”、“新华西站—西龙王庙站”、“公主府站—工农兵路站”、“成吉思汗广场站—折里木路站”、“东二环路站—丁香路站”、“白塔西站—新华东街站”。

通过上述线路的构建，将快速路公交二号线与地铁线路紧密的联系了起来，提升了公交服务能力，让常规公交与轨道交通衔接更加顺畅，促进了公交地铁优势互补，能在高峰时期满足更多人员高峰出行时期的出行需求。

## 6、模型评价改进与推广

### 6.1 模型的优点

问题一的模型综合考虑了多方面的满意度，优化求解结果具有一定的准确性；

问题二的模型将政府、公司、乘客多方利益进行了最佳优化，同时满足多方需求；

问题三的模型采用了一种评价交通效益的参数，能够定量的提高错峰出行的效果；

### 6.2 模型的缺点

问题二的模型中线路选择依据的是现有城市情况与近期规划，缺乏与城市远期规划的结合。

问题三的模型中站点周边居民的行业比例为假设值，缺乏具体权威的调查数据。

### 6.3 模型的推广

在理想的无干扰的情况下，城市道路公交与地铁的运营组织具有较大的相似性，因此城市公共交通的运营间隔优化可以参照地铁的研究理论和方法。从这个思路拓展开来，未来的城市道路公交运营组织的优化工作，可以使用本文的研究结果和理论模型。未来可将地铁站点选址模型推广到所有公共交通统一考虑，实现优势互补，完成城市整体交通网的建设。

## 参考文献

- [1] 薛彤. 城市轨道交通列车开行计划调整优化方法研究[D]. 西南交通大学, 2018.
- [2] 严波. 城市轨道交通行车间隔时间优化模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2008(06):53-57.
- [3] 刘东晓, 姜志侠, 周圣杰. 城市轨道列车发车间隔的优化方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017,40(04):115-119.
- [4] 杜晓婷, 郭进利. 城市轨道交通列车编组优化研究[J]. 软件导刊, 2019.
- [5] 孙飞, 桂行东, 李婷, 等. 基于Pareto多目标遗传算法的高峰时段多地铁列车节能优化[J]. 铁道标准设计, 2017,61(12):114-119.
- [6] 张也弛. 城市地铁选址方法研究[J]. 科技创新导报, 2015,12(11):78.
- [7] 王建省, 高永刚, 王宗泽, 等. 地铁站点选址数值模型的研究[J]. 中国科技信息, 2016(24):56-57.
- [8] 王琮, 梁青槐. 城市轨道交通合理站间距的研究[J]. 铁道运输与经济, 2012,34(06):82-85.
- [9] 卞晓. 地铁线路网络规划问题及解决思路探讨[J]. 科技资讯, 2011(18):35-37.
- [10] 袁绍欣, 赵祥模, 刘占文, 等. 交通错峰出行策略仿真模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010,30(05):75-78.
- [11] 朱婷婷. 错峰上班措施下通勤廊道出行行为分析及优化[D]. 合肥工业大学, 2016.
- [12] 杨晓光, 褚浩然. 错峰出行对城市交通的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006(07):899-903.
- [13] 张平, 秦志. 南宁轨道1号线公交配套衔接规划研究[J]. 西部交通科技, 2017(03):75-78.
- [14] 魏华. 轨道交通与常规公交衔接优化关键问题研究[D]. 长安大学, 2014.
- [15] 陈怀杰. 地面常规公交与城市轨道交通接驳研究[D]. 长安大学, 2015.
- [16] 张思林, 袁振洲, 曹志超. 基于出行成本和运营成本的接驳城市轨道交通社区公交站点布设研究[J]. 北京交通大学学报, 2016,40(06):57-63.