

2021 第六届“数维杯”大学生 数学建模竞赛论文

题 目 地铁优化设计与运营管理综合研究

摘 要

城市轨道交通是缓解城市拥挤的重要途径之一。城市轨道交通的设计难度高、建设工期长,修建完成后线路无法更改,后期的运行管理对便捷安全出行也有着重要的作用。因此城市轨道交通的合理设计、站点规划和协调运行显得特别重要。本文基于呼和浩特市轨道交通的运行数据,分别对以上问题进行研究。

对于问题一,需对地铁车厢数量进行优化,同时对发车间隔进行分析研究。针对该问题,本文首先建立了以乘客等待时间最小为优化目标的单一交路开行方案模型,设置了满载率约束、追踪间隔约束、折返作业时间约束和停站时间约束。而后针对于以上模型,设计了求解的遗传算法。最后得到了优化后列车行驶的时刻表,对列车的满载率变化进行了分析,对比分析了乘客等候时间的变化。结果表明,通过模型优化调整后,车厢数量增加至 8 节,满载率小于等于 110%。在晚高峰 17:00-19:00 之间,发车间隔 7 分钟为最优,其余时段 9~10 分钟为最优。

对于问题二,需对地铁的站点进行规划,对地铁的运营盈利情况进行分析。针对该问题,本文建立了车站选取的覆盖量模型与费用效益模型,通过覆盖量模型能够对地铁站点路线的人口覆盖程度进行分析,结合费用效益模型对路线站点布设进行检验,从而得到效益影响下的地铁最优站距与站点布设方案。结果表明,新增线路优化后共有 12 个站点,人口覆盖量为 209855 人,日均活跃 2 万余人能够实现地铁运营的盈利目标。

对于问题三,需对高峰时期地铁承载过度拥挤的问题提出错峰方案,实现平峰目标。针对该问题,本文首先对高峰大客流控制方法进行了研究,提出了限流强度计算模型和限流时段的确定方法。而后又对基于线路发车间隔缩减输送能力增强的方案进行了研究,分析了调整线路及时段确定的方法。最后通过最优聚类结果对危险车站进行了识别,分别运用以上两种方法对危险车站的限流效率进行了分析,依据分析结果对高峰限流措施提出建议。结果表明,对危险车站实施进站限流比缩减重点线路的发车间隔更能确保网络的整体畅通性,能够维持较高的服务水平。

对于问题四,为了提高高峰时期人员的出行效率,需对公交协同调节的问题进行分析,提出新的公交协同线路。针对该问题,本文通过分析常规公交出行时间随车站间距的变化关系,建立了协同地铁的常规公交站间距优化模型,并对协同城市地铁的新增接运常规公交线网调整方法进行了分析,设置了站间距调整参数,对模型进行了求解。依据求解的结果,对新华广场以东公交站间距进行了优化,删除了不必要的 3 个站点。增设了 3 条新线路,用于协调不同区域人员高峰出行时期的出行效率,分别为新增公园公交线路、新增大学城公交线路和新增 2 号线西侧沿线公交线路。

关键词 城市轨道交通;追踪间隔;遗传算法;限流强度;聚类求解;公交协同线路

目 录

一、问题重述	3
1.1 问题背景	3
1.2 待解决的问题	3
二、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
三、模型假设	4
四、定义与符号说明	4
五、问题一模型的建立与求解	5
5.1 单一交路开行方案模型	5
5.1.1 模型建立	6
5.1.2 约束条件	6
5.2 模型遗传算法设计	7
5.3 求解结果分析	8
六、问题一模型的建立与求解	9
6.1 车站选取的覆盖量模型与费用效益模型	9
6.1.1 覆盖量模型	9
6.1.2 费用效益模型	10
6.2 线路定位	12
6.3 最优站距与站点布设	14
七、问题二模型的建立与求解	14
7.1 高峰大客流控制方法研究	14
7.1.1 限流强度计算	15
7.1.2 限流时段确定	16
7.2 基于线路发车间隔缩减的输送能力增强	16
7.2.1 调整线路及时段确定	16
7.2.2 发车间隔缩减量推导	16
7.3 限流策略分析	17
7.3.1 识别危险车站	17
7.3.2 限流策略优化效果对比分析	18
八、问题三模型的建立与求解	20
8.1 协同地铁的常规公交优化模型	20
8.1.1 协同地铁的常规公交站间距优化模型	20
8.1.2 协同城市地铁的新增接运常规公交线网调整	21
8.2.常规公交站间距调整	22

8.2.1 站间距调整参数	22
8.2.2 间距调整建议	22
8.3 公交线网调整	23
九、模型的评价及优化	24
9.1 模型的评价	24
9.2 模型的优点	25
9.3 模型的缺点	25
9.4 模型的推广	25
参考文献	26

一、问题重述

1.1 问题背景

在城市交通环境日益拥挤的今天，发展以城市轨道交通为核心的骨干交通项目是改善城市交通环境的最基本方法之一。城市轨道交通的快速发展有效缓解了当前城市交通压力，极大的方便了城市内部居民的出行。在城市轨道交通网络中，地铁是不可或缺的重要组成部分，它指的是以地下运行为主的高密度、高运量城市轨道交通系统，具有快速、准时、节能、节约地面空间等优点。鉴于地铁建成后为城市居民带来的诸多优点，中国大陆地区许多城市都将地铁建设纳入了城市长远发展规划中。目前在全国范围内有运营地铁线路的城市有 43 个，然而因其高昂的建设成本、后期运营成本及便民的收费标准，众多地铁线路均存在一定规模的亏损。因此提出合理的地铁建设及运营方案显得非常重要，特别是对于诸如呼和浩特市这一类常住人口相对较少但交通道路较为拥堵的城市。

1.2 待解决的问题

(1) 根据附件 2 给出的各站点进出站人数数据，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。

(2) 结合附件 1 及呼和浩特市城市自身特点你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。

(3) 考虑到疫情依旧持续较长的时间，提出一种错峰的出行方案。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。

(4) 在充分考虑呼和浩特市城市快速路的基础之上，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。

二、问题分析

2.1 问题 1 的分析

对于问题 1，需对地铁车厢数量进行优化，同时对发车间隔进行分析研究。针对该问题，本文首先建立以乘客等待时间最小为优化目标的单一交路开行方案模型，设置满载率约束、追踪间隔约束、折返作业时间约束和停站时间约束。而后针对于以上模型，设计求解的遗传算法。最后得到优化后列车行驶的时刻表，对列车的满载率变化进行分析，对比分析乘客等候时间的变化。

2.2 问题 2 的分析

对于问题 2，需对地铁的站点进行规划，对地铁的运营盈利情况进行分析。针对该问题，本文建立车站选取的覆盖量模型与费用效益模型，通过覆盖量模型能够对地铁站点路线的人口覆盖程度进行分析，结合费用效益模型对路线站点布设进行检验，从而得到效益影响下的地铁最优站距与站点布设方案。

2.3 问题 3 的分析

对于问题 3,需对高峰时期地铁承载过度拥挤的问题提出错峰方案,实现平峰目标。针对该问题,本文首先对高峰大客流控制方法进行研究,提出限流强度计算模型和限流时段的确定方法。而后又对基于线路发车间隔缩减输送能力增强的方案进行研究,分析调整线路及时段确定的方法。最后通过最优聚类结果对危险车站进行识别,分别运用以上两种方法对危险车站的限流效率进行分析,依据分析结果对高峰限流措施提出建议。

2.4 问题 4 的分析

对于问题 4,为了提高高峰时期人员的出行效率,需对公交协同调节的问题进行分析,提出新的公交协同线路。针对该问题,本文通过分析常规公交出行时间随车站间距的变化关系,建立协同地铁的常规公交站间距优化模型,并对协同城市地铁的新增接运常规公交线网调整方法进行分析,设置站间距调整参数,对模型进行求解。依据求解的结果,对新华广场以东公交站间距进行优化,删除不必要的 3 个站点。增设 3 条新线路,用于协调不同区域人员高峰出行时期的出行效率,分别为新增公园公交线路、新增大学城公交线路和新增 2 号线西侧沿线公交线路。

三、模型假设

- (1) 假设列车在运行行为站站停的方式,无越行,且发车顺序固定;
- (2) 假设各站客流需求已知,且乘客按照到达顺序上车,当列车的满载率超过规定值时,乘客将等待下一趟列车;
- (3) 假设单一交路运行时,线路只有一个车辆段,列车收车时均返回该车辆段;
- (4) 假设各次列车到达线路的终点站或折返站时,车上乘客全部下车;
- (5) 假设乘客上车时遵循优先到达优先服务的原则;
- (6) 假设车站是比线路区间更容易进行客流组织管控的场所,本文递推模型侧重于研究车站(节点)的客流状态,对区间断面满载率的分析仅在网络客流状态评价指标考虑。

四、定义与符号说明

符号定义	符号说明
P_i	第 i 个染色体的累计适应度概率
r	在 0-1 之间随机生成一个随机数
θ_i	居民选择轨道交通出行的比例
TP	城市轨道交通车站带来的主要效益
C	城市轨道交通车站增加的主要费用
P_1 (元)	增设车站带动周边土地升值的经济效益折算值
P_2 (元)	增设车站引起的第 i 年平均日增客流 k_i 带来的经济效益折算总值
n	车站设计使用年限
dis (km)	旅客平均乘距
ap (元/人 km)	每公里平均票价
p	折现率
k_i (人/日)	第 i 年平均日增客流量
i	计算年度
C_1 (元)	车站工程造价

C_i (元/年)	增设车站的第 i 年工程投资
m	建设期年限
C_2	设站引起的运营费用折算总额
d (元/旧日)	设站引起的日运营费用增加额
C_3 (元)	配车数增加所产生的附加投资折算值
e (元/辆)	每辆车的平均造价
G (人/h)	增设车站前的高峰小时单向断面最大客流量
L (km)	运营线路的长度
α	日增客流分配到高峰小时最大客流断面方向的比例
v_2 (km / h)	增设车站后的车辆旅行速度
S (人/辆)	车辆最大负载
λ	车辆备用检修系数
CA_i	i 站进站闸机的实际利用能力之和
C_j^A	单个闸机 j 的实际利用能力
$N_{i,AG}^{in}$	i 站高峰时段启用的进站闸机数量
C_D	单个闸机设计通行能力
Q_j^h	高峰时段闸机 j 的进站量
Q_j	闸机 j 的全日进站量
γ_i	i 站进站量折减系数，即限流强度
P_i^{in}	i 站进站量
η	限流效果折减系数，本文取经验值 $\eta=0.3$ 进行折减
γ_i^R	实际限流强度
$P_l^{sat}(t)$	t 时刻线路 l 的饱和区间率
$N_l^{sat}(t)$	t 时刻线路 l 的饱和区间数
N_l	线路 l 的区间总数
et_k	节点 k 的拥挤程度
P	与客流量有关的变量，本节假设其保持不变
c_k	节点 k 的输送能力
c_j	节点 k 所属线路 j 的输送能力
C_j'	调整后线路 j 的输送能力
$\Delta t'$	某时间段，在后文实例计算时依然为仿真间隔 3min
I_j	线路发车间隔
A_j	线路 j 运营列车的定员人数
C_j	线路 j 调整前输送能力

五、问题一模型的建立与求解

5.1 单一交路开行方案模型

首先考虑单一交路运营时的乘客候车时间和列车满载率的均衡性，调整列车首站发车时间，合理控制沿途各站停车时间，从而减少乘客的等待时间。同时将列车满载率调整到最佳范围，使得车厢内的乘客舒适度提高，从而达到提高服务水平目标。

5.1.1 模型建立

根据线路情况，在单一交路开行方案下，建立以乘客等待时间最小为优化目标，控制满载率水平，以追踪间隔、折返间隔等为约束条件的时刻表优化模型。

乘客等待时间的计算，考虑新到达站台的乘客以及滞留乘客两部分乘客的候车时间，其中，新到达站台的乘客等待时间等于乘客到站台的时间和下一趟列车离开该站的时间之间的差值，可以根据乘客到达站台规律计算。在列车满载率高于满载率标准时会出现乘客无法上车的滞留情况，即滞留乘客等候下一趟列车，滞留乘客的滞留等待时间为这一趟车和下一趟车在该站的发车间隔，因此乘客的等待时间为乘客到达站台后等待下一列车到来的时间和因满载率过高无法登车产生的滞留时间总和。

据此，以乘客等待时间最小为优化目标建立单一交路情况下的目标函数：

$$\min T = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{2N} \int_{T_{j-1}^k}^{T_j^k} \mu_k^1(t)(T_j^k - t) dt + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{2N} R_k(T_j^k - T_{j-1}^k) \quad (5-1)$$

5.1.2 约束条件

(1) 满载率约束

列车满载率是指运营车辆运载乘客的平均满载程度，满载率的计算方法为车上乘客数与列车定员的比值，当满载率超过一定值时乘客无法继续上车，此时乘客滞留等候乘坐下一列车。

$$\frac{P_{j,k}}{A} \leq \rho \quad (5-2)$$

(2) 追踪间隔约束

追踪间隔是指同一区段内相邻两列车的安全追踪间隔，自动驾驶模式的列车通常根据前车距离进行追踪，追踪间隔较大会减小运力，在高峰期可能导致满载率水平较高，影响乘客服务水平。追踪间隔过小会导致突发事件难以处理，存在安全隐患。追踪间隔约束主要取决于技术因素。

$$P_{min}^k \leq T_j^k - T_{j-1}^k \leq P_{max}^k \quad (5-3)$$

(3) 折返作业时间约束

折返作业时间为列车进行折返作业时所需要的时间，通常包含纯折返时间及出入折返线的时间，列车在不同折返站进行折返的作业时间不同，其折返作业时间主要取决于技术因素，受线路能力限制。

$$T_j^{N+1} - T_j^N \leq Q_{min}^N \quad (5-4)$$

(4) 停站时间约束

列车的停站时间为列车在到站到列车离站间的时间长度，包含了开门前的准备工作时间、列车开关门及等待时间、列车关门后发车前的准备时间等。受设备情况、车厢拥挤程度、站台人数等因素影响。列车停站时间设置过长会影响整体运营效率，延长乘客在车时间，列车停站时间过短会导致乘客上车前奔跑拥挤，同时可能增多站台滞留乘客数，可能造成安全隐患。

$$D_{min} \leq T_j^{k+1} - T_j^k - h^k \leq D_{max} \quad (5-5)$$

5.2 模型遗传算法设计

(1) 初始解生成

染色体的编码方式有很多种，一般常用的二进制编码，实数编码，格雷码编码等等。通常需要针对不同的问题设计不同的编码方案，并且设计的编码方案贯穿算法的整个迭代过程，所以一个合适的编码方案能够大大提高算法的快速性和针对性。本文针对列车运行单一交路问题设计了一维实数编码方案，代表每列列车的发车间隔，则染色体长度总共为 J ，具体编码方案如图 5-1 所示。

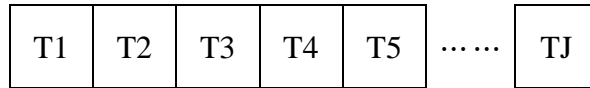


图 5-1 单一交路情况下的编码方案

(2) 适应度函数

本节研究的单一交路列车运行优化问题，目标函数为最小化乘客的平均等待时间，因此相应的单一交路的适应度函数如公式 5-6 所示。

$$fitness = \frac{1}{obj + flag \times M} \quad (5-6)$$

式中， $obj = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{2N} \int_{T_{j-1}^k}^{T_j^k} \mu_k^1(t)(T_j^k - t) dt + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{2N} R_k(T_j^k - T_{j-1}^k)$;

如果得到的解满足载率约束，折返作业时间约束以及停站时间约束， $flag = 0$ ，否则 $flag = 1$ ； M 是一个极大的数。

(3) 遗传操作

1) 选择

本算法采用轮盘赌选择法对个体进行选择，具体步骤如下：

step1: 计算第 i 个染色体的累计适应度概率 P_i 。

Step2: 在 0-1 之间随机生成一个随机数 r ，如果 $r \leq P_1$ ，则选择第一个染色体；如果 $P_{i-1} \leq r \leq P_i$ ，则选择第 i 个染色体，一直循环操作 popsize 次，即可得到种群规模为 popsize 的父代种群。

2) 交叉

本算法采用的是两点交叉法，具体方法如图 5-2 所示。

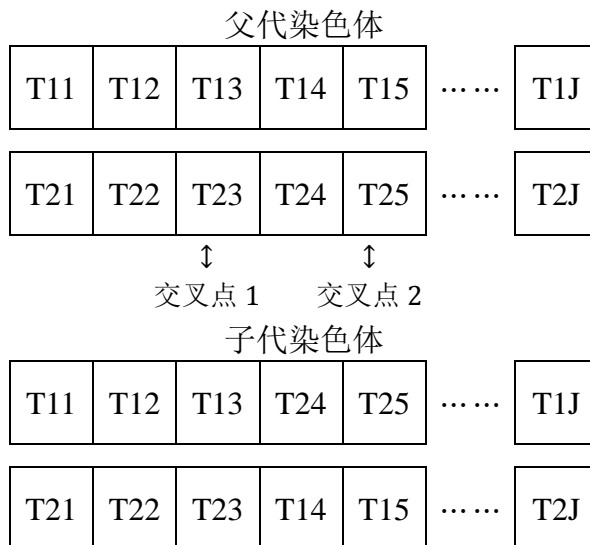


图 5-2 单一交路情况下的两点交叉

3) 变异

本算法采用的变异方式为随机选择一点进行变异即改基因片段上的值，具体方法如图 5-3 所示。

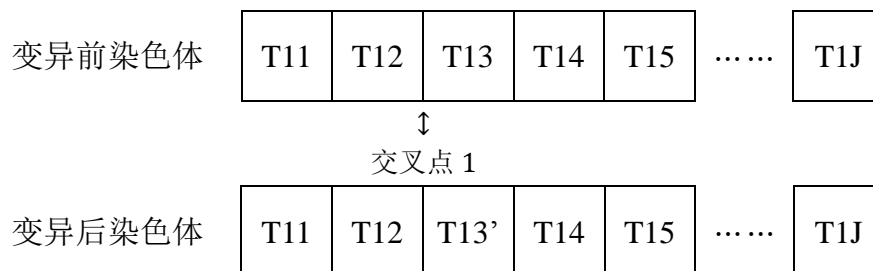


图 5-3 单一交路情况下的变异方法

5.3 求解结果分析

以 2020 年 9 月 2 日 16:00 至 21:00 的客流数据为基础，使用 matlab 编程，对建立的模型进行验证分析。

(1) 目标函数分析：

通过编程对单一交路模型的有效性进行验证，得到的收敛曲线如图 5-4 所示，根据图示可得，遗传算法模型在第 8 代之后收敛，求得了问题的最优解，说明该模型和算法可以对时刻表优化问题进行求解。

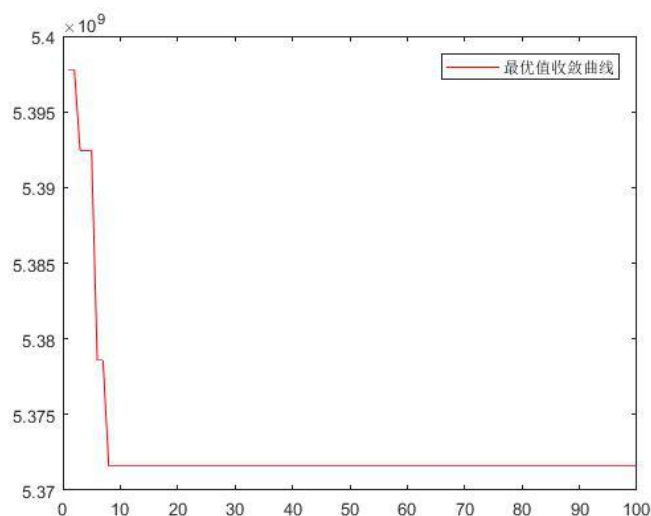


图 5-4 单一交路模型最优值收敛曲线

(2) 最优列车时刻表

在单一交路情形下得到列车运行时刻表，根据时刻表绘制出的列车运行图如图 5-5 所示，运行图局部调整情况如图 5-6 所示，可以看出优化后的时刻表根据断面客流情况，列车发车间隔变化。在 16:00~21:00 时段内，总共发出列车 57 列。其中，在晚高峰 17:00-19:00 之间，发车间隔 7 分钟为最优，其余时段 9~10 分钟为最优。

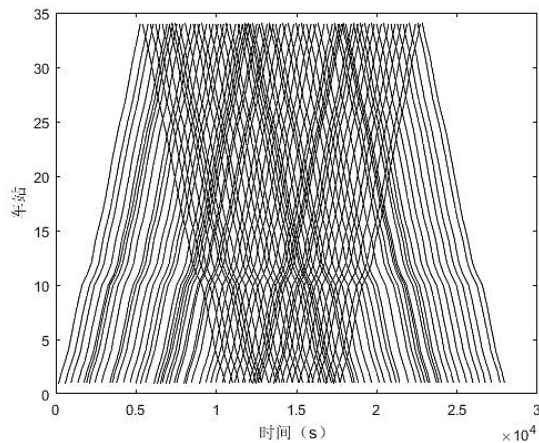


图 5-5 单一交路模型时刻表优化结果

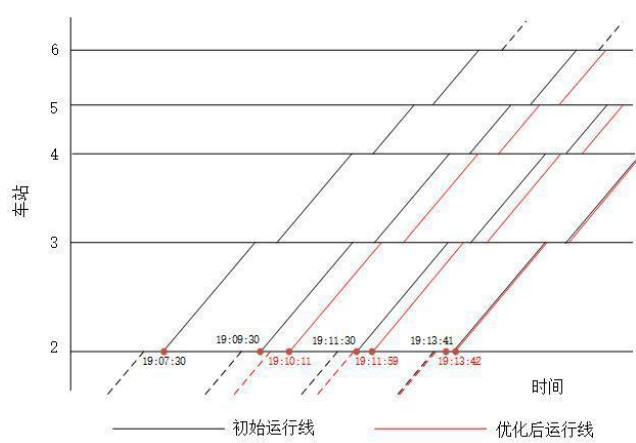


图 5-6 单一交路模型优化后运行图局部

(3) 断面满载率变化

对比下行列车满载率，现状时刻表下 1 号线和 2 号线拥挤车站的满载率在 17:00 至 19:00 间均大于 120%，当满载率到达这一水平时乘客在车厢内会感觉活动困难，相互接触频繁，存在明显的挤压现象，此时车厢内的乘客上下车行为和下车行为使用的时间都会受到影响。单一交路下优化前后满载率对比如图 5-7 所示，可以看出通过模型优化调整后，车厢数量增加至 8 节，该时段的满载率小于等于 110%，且满载率高于 100% 的列车仅占该时段列车总数的 28%，此时虽然列车负载较高，但乘客的上车行为和下车行为不会因过度拥挤而受到影响，和现状时刻表相比已经明显的提升了乘客的出行体验。

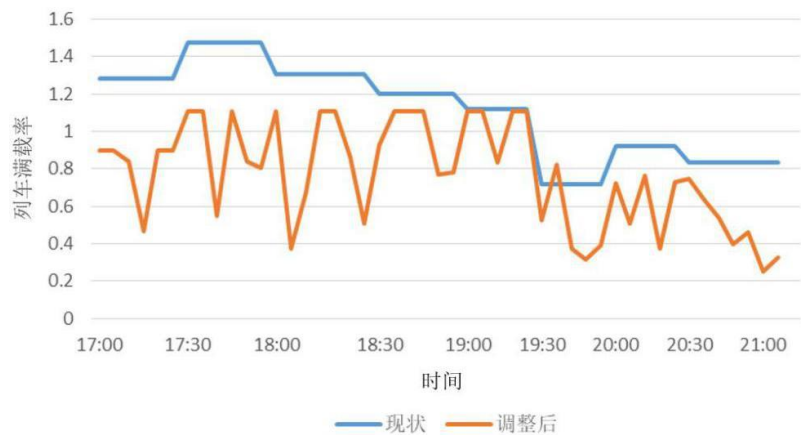


图 5-7 单一交路下优化前后满载率对比

(4) 乘客等候时间变化

分析调整前后的时刻表，计算得到乘客总等候时间的变化，得到结果在现状时刻表下旅客的总等待时间为 7103.11 分钟，优化时刻表后，旅客的总等待时间为 7109.8 分钟，对比调整后旅客的总等待时间下降了 20.4%。据此可以说明根据乘客需求调整后的模型对于减少乘客候车时间从而提高服务水平有明显的效果。

六、问题二模型的建立与求解

6.1 车站选取的覆盖量模型与费用效益模型

6.1.1 覆盖量模型

将城市轨道交通线路规划区域采用网格离散化，并设每一个整数坐标点 (x, y) 处的人口为 $p(x, y)$ 。站点的吸引区域（影响区域）采用如图 6-1 所示同心的钻石形区域表示。

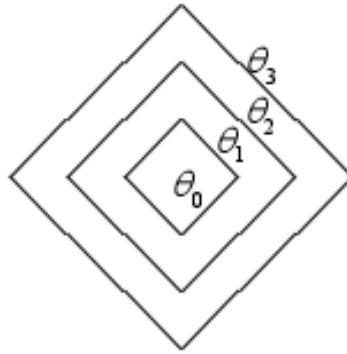


图 6-1 站点的钻石形吸引区域图

一般地，乘客采用轨道交通方式出行的比例随乘客距轨道交通站点的距离而减小。对于轨道交通站点钻石形吸引区域，假设处于同一步行半径上的居民采用轨道交通出行的比例相同，用比例系数 θ_i 表示距站点 i 个步行单位的居民选择轨道交通出行的比例，且假设乘客步行到附近轨道交通站点以 Manhattan 距离计量。

假设处于站点上的居民选择轨道交通出行的比例为 $\theta_0 = 1$ ；距轨道交通站点 1、2、3 个步行单位的居民选择轨道交通出行的比例为 $\theta_1 = 1$ 、 $\theta_2 = 0.5$ 、 $\theta_3 = 0.25$ 。对于距轨道交通站点 3 个步行单位以上的居民选择轨道交通出行比例为 0，即 $\theta_i = 0, i > 3$ 。

站点 s 覆盖的总人口数称为站点覆盖量，定义如下，

$$C(s) = \sum_{i=0}^3 \sum_{(x,y): D[(x,y),s]=i} \theta_i p(x, y) \quad (6-1)$$

(6-1)式中， $D[(x, y), s]$ 为任一点 (x, y) 到站点 s 的 Manhattan 距离。

图 6-2 中所示站点坐标为(5,5)，坐标系中各点人口分布如图所示。以下将计算该站点的人口覆盖量，

$$C(s) = 10\theta_0 + 20\theta_1 + 31\theta_2 + 45\theta_3 \quad (6-2)$$

此处定义的站点覆盖量是将站点周围的人口离散化处理，并假设人口集中于站点周围的某点上。因此在布设站点时，考虑站点的覆盖量，对于站点覆盖量大的点优先设置为候选站点。

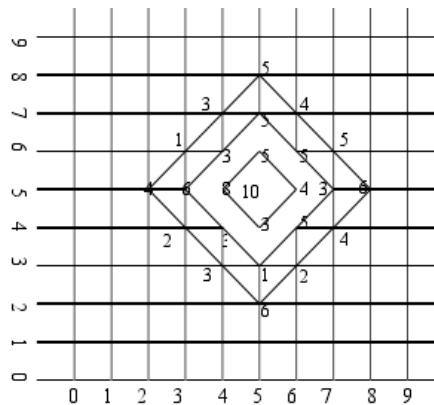


图 6-2 站点 s 的人口覆盖量示意图

6.1.2 费用效益模型

城市轨道交通车站分布及其间距大小会对工程投资、运营成本、运营方案、客流量

等系统的费用效益指标产生错综复杂的影响,所以在确定轨道交通车站分布方案时,应综合考虑,合理确定。为判断轨道交通线路中某一车站设置的合理性,可采用费用效益分析方法,从我国实际情况出发,预期年限内效益大于费用应成为轨道交通设站的基本条件。

通常设置城市轨道交通车站带来的主要效益 TP 和增加的主要费用 C 可以通过以下公式来表达。

(1) 效益计算公式

$$TP = P_1 + P_2 \quad (6-3)$$

(6-3) 式中, P_1 (元)为增设车站带动周边土地升值的经济效益折算值,假定土地的升值在车站建成时一次性完成。

P_2 (元)为增设车站引起的第 i 年平均日增客流 k_i 带来的经济效益折算总值。假定其在第 i 年年末一次性发生,则

$$P_2 = \sum_{i=1}^n 365 \times dis \times ap \times k_i \times (1+p)^{-i} \quad (6-4)$$

(6-4) 式中, n 为车站设计使用年限; dis (km)为旅客平均乘距; ap (元/人·km)为每公里平均票价; p 为折现率; k_i (人/日)为第 i 年平均日增客流量; i 为计算年度。

(2) 费用计算公式

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (6-5)$$

(6-5) 式中, C_1 (元)为车站工程造价,且

$$C_1 = \sum_{i=1}^n C_i (1+p)^{-i} \quad (6-6)$$

(6-6) 式中, C_i (元/年)为增设车站的第 i 年工程投资, m 为建设期年限。 C_2 为设站引起的运营费用折算总额,元,且

$$C_2 = \sum_{i=1}^n 365 \times d \times (1+p)^{-i} \quad (6-7)$$

(6-7) 式中, d (元/旧日)为设站引起的日运营费用增加额。

C_3 (元)为配车数增加所产生的附加投资折算值 (开通运营前一年支付),且

$$C_3 = N_{\text{增}} \times e \times (1+p) \quad (6-8)$$

(6-8) 式中, e (元/辆)为每辆车的平均造价,可根据所选车型来确定; $N_{\text{增}}$ (辆)为由于增设车站所需增配的车辆数,可按下式计算,

$$N_{\text{增}} = \frac{2}{S} \left[G \frac{T_{\text{差}}}{3600} + \frac{Lk_i\alpha}{24v_2} \right] (1+\lambda) \quad (6-9)$$

(6-9) 式中, G (人/h)为增设车站前的高峰小时单向断面最大客流量; $T_{\text{差}}$ (s)为由于增设 1 个车站而引起的运行时间增加值,一般取为 60s; L (km)为运营线路的长度; α 为日增客流分配到高峰小时最大客流断面方向的比例; v_2 (km/h)为增设车站后的车辆旅行速度; S (人/辆)为车辆最大负载; λ 为车辆备用检修系数。

从社会经济角度考虑,当 $TP > C$ 时,则设站是经济可行的。另外,为了充分发挥城市轨道交通列车的快速性能,在工程实施或运营过程中还可以采取以下措施,

如果某拟设车站处当前客流量较小,但潜在客流量比较大、且符合上述从社会经济角度考虑的设置车站条件,则可以采取预留远期设站条件的措施;

如果符合上述社会经济角度设站条件的车站设置较密,可以在充分考虑各个车站客流需求的前提下,保留车站较密的设置模式,通过使轨道交通列车在相关车站交错停车的列车运营组织方法,来增加列车以最高速度走行的距离,从而在保证列车达到一定的旅行速度的同时,最大可能地吸引沿线客流。

地铁 1、2 号线选取的部分线路站点的人口覆盖量为，

$$C(X) = \sum_{i=1}^{13} C(S_i) = 227387(\text{人})$$

地铁 1、2 号线选取的部分线路上单位长度的站点人口覆盖量为，

$$\frac{\sum_{i=1}^{13} C(S_i)}{\sum_{i=1}^{13} l_i} = \frac{227387}{12.72} = 17876(\text{人})$$

根据线路上候选点、线路覆盖量的定义及覆盖量的计算方法计算表 6-1 中的小区所在位置的人口覆盖量。由于该线路全部覆盖于呼和浩特市市区，为了简化起见，将各个站点小区的平均吸引半径定为以站点小区中心为圆心的 500m 为半径的圆形区域。则各个小区人口覆盖量如表 6-2 所示。

根据确定站点间双向搜索算法，该线路的大致走向如图 6-4 中所示，线路长度为 11.2km。

表 6-2 各个站点的人口覆盖量

站点名称	站点人口覆盖量	站点名称	站点人口覆盖量
1f	17710	2b	26605
1g	14254	2d	28121
1i	13051	2f	9311
1j	15396	2h	22758
1k	8580	2k	28463
1l	14527	2n	26707
1m	5816	2q	27355
1n	26404	2s	25937
1o	24420	2u	25361
1p	23767	2x	20884

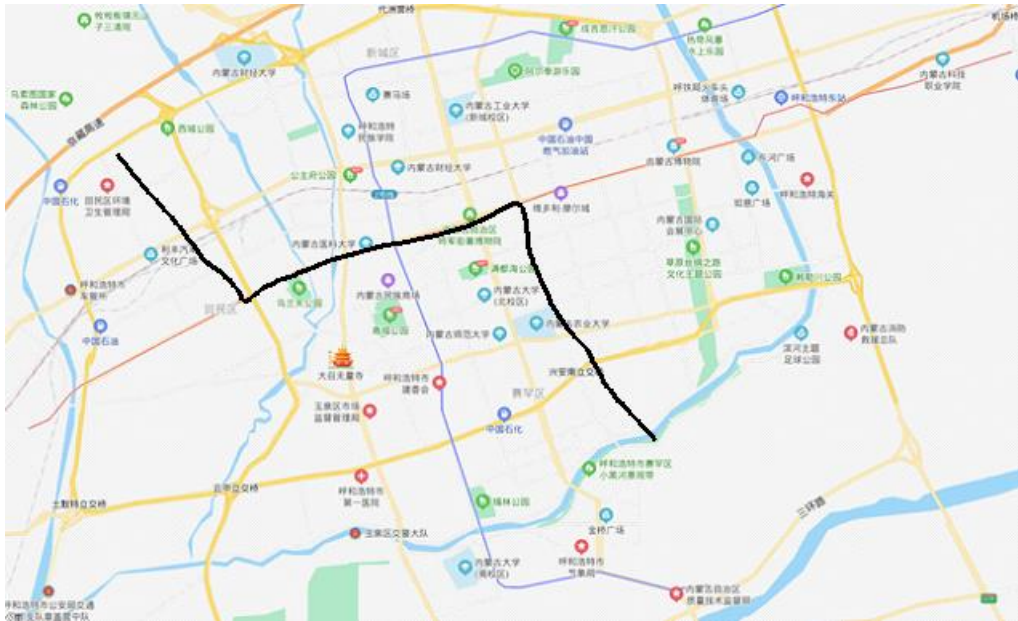


图 6-4 地铁 1、2、3（新）号线走向

则新线路站点的人口覆盖量为，

$$C(X) = \sum_{i=1}^{12} C(S_i) = 209855(\text{人})$$

则新线路单位长度站点的人口覆盖量为，

$$\frac{\sum_{i=1}^{12} C(S_i)}{\sum_{i=1}^{12} l_i} = \frac{209855}{11.2} = 18737(\text{人})$$

由以上分析可知，运用城市轨道交通三阶段确定的轨道交通线路大致走向与市区东西向交通走廊上主要客流方向一致，缓解高峰端面流量。新线路单位长度上人口覆盖量要大于原始线路单位长度上人口覆盖量，若按此线路方案铺设线路，能更好满足乘客出行需要。因此新线路走向能够较好地解决东西向交通走廊交通运能与运量的矛盾，改善交通条件，为市民出行创造良好交通条件。

6.3 最优站距与站点布设

运用基于乘客总出行时间最少的最优站距模型和覆盖量模型验证地铁的最优站距，以及各个站点的布设。

基于乘客总出行时间最少的最优站距 d 满足以下方程，

$$(v - 2v_t)d^2 = 2l_a v v_t (t_s + v/a) \tag{6-10}$$

根据呼和浩特市地铁线路选用车辆主要技术参数对(6-10)式中的变量进行标定，取， $v = 12\text{m/s}$ ， $v_t = 1\text{m/s}$ ， $l_a = 6.67\text{km}$ ， $t_s = 20\text{s}$ ， $a = 0.98\text{m/s}^2$ ，代入(6-10)式可得最优站距为， $d = 1.016\text{km}$ 。

运用城市轨道交通三阶段规划法确定的线路长度为 11.2km ，基于乘客出行时间最短的最优平均站距为 1.016km ，因此可在线路上布设 12 个站点。从工程建设费用的方面来考虑，若依照该方案来布设线路将能够节省部分线路、站点建设费用。

表 6-3 车站表

序号	站点	站间距 (km)
1	3a	0.9
2	3b	1
3	3c	0.8
4	3d	0.8
5	3e	1.2
6	3f	1.2
7	3g	0.7
8	3h	1.05
9	3i	1.35
10	3j	1.06
11	3k	1.14
12	3l	

由于呼和浩特市轨道交通运营成本数据的缺乏，本节中只应用站点覆盖量模型进行了线路上站点布设。结合呼和浩特市实际地形，依据站点覆盖量模型，线路上布设的 12 个站点如表 6-3 所示，此时线路上站点实际平均站距为 1.018km 。地铁实际平均站距为 $14.35/13=1.1\text{km}$ 。因此用城市轨道交通三阶段规划法所确定的平均站距趋向于最优平均站距 1.016km ，由此说明城市轨道交通三阶段规划法的合理性。

七、问题三模型的建立与求解

7.1 高峰大客流控制方法研究

高峰大客流在城市轨道交通网络中具有扩散性。若其传播扩散趋势不能得到有效缓

解，越来越多的乘客将滞留在轨道交通系统中，拥挤态线网区域随之增多，运输能力供给将逐渐地无法满足出行需求，导致轨道交通运营的安全风险大大增加。为此，有必要对高峰大客流进行控制。

高峰大客流形成的直接原因是特定时空条件下，运能供给无法满足出行需求。本章分别针对需求侧和供给侧提出了高峰大客流控制方法。

7.1.1 限流强度计算

早高峰进站系数表示的早高峰特征和进站闸机数量反映的进站闸机启用率可以用来识别危险车站，此二者对车站进站闸机处客流控制的贡献性相反：高峰特征越明显，车站在短时间内产生大幅进站量的可能性越大；进站闸机启用率越高，则能够允许更多乘客在短时间内快速进站，有助于疏解进站闸机处的排队等候，避免产生拥挤。

危险车站受高峰大客流的影响，可能出现进站闸机通行能力无法完全满足乘客进站需求的情况。考虑进站闸机通行能力与高峰进站量的均衡，如图 7-1：或对进站量进行限制，以匹配既有闸机设备通行能力，如图 a)；或增加闸机设备，提高通行能力，满足乘客的进站需求，如图 b)。本节采用图 a) 均衡方式。

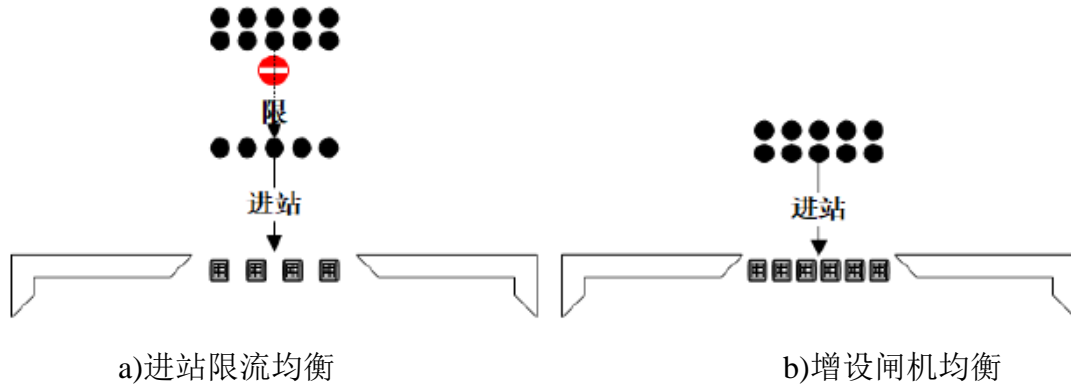


图 7-1 进站均衡方式

然而在实际运营中，闸机的设计通行能力基本能够满足高峰期的客流需求，这意味着除非闸机发生故障停止运行，否则很少出现乘客因拥挤停滞而无法通过进站闸机的情形。由此，本文以闸机实际利用能力表示闸机设计通行能力的实际利用程度。通过分时段闸机通行量数据，计算高峰时段闸机进站量占全天进站量的比例，得到车站进站闸机实际利用能力之和，以之与进站量进行均衡。

(1) 闸机实际利用能力主要考虑高峰时段进站量占比，在其设计通行能力上进行了一定程度的折减，见式 (7-1)：

$$CA_i = \sum_{j=1}^{N_{i,AG}^{in}} C_j^A = C_D \sum_{j=1}^{N_{i,AG}^{in}} \frac{Q_j^h}{Q_j} \quad (7-1)$$

CA_i —— i 站进站闸机的实际利用能力之和； C_j^A ——单个闸机 j 的实际利用能力； $N_{i,AG}^{in}$ —— i 站高峰时段启用的进站闸机数量； C_D ——单个闸机设计通行能力； Q_j^h ——高峰时段闸机 j 的进站量； Q_j ——闸机 j 的全日进站量。

(2) 具体计算时限流强度时，考虑进站量与进站闸机实际利用能力的差异系数，计算方法见式(7-2)：

$$\gamma_i = \frac{1}{CA_i} (P_i^{in} - CA_i) \quad (7-2)$$

γ_i —— i 站进站量折减系数，即限流强度； P_i^{in} —— i 站进站量。

(3) 考虑到实际执行限流时可能遇到一定阻碍，例如出现乘客强行闯入进站、安检工作人员疏忽等情况（尤其在客流高峰期，类似事件有更高的发生概率）。因此，通常情况下无法百分之百地实施理论限流强度，实际限流强度计算见式（7-3）：

$$\gamma_i^R = (1 - \eta)\gamma_i = 0.7\gamma_i \quad (7-3)$$

η ——限流效果折减系数，本文取经验值 $\eta=0.3$ 进行折减； γ_i^R ——实际限流强度。

7.1.2 限流时段确定

根据初步验证中对实际数据时间的处理，将早高峰划分为 4 个 30min 时长子时段，各危险车站的限流时段为出现最大进站量的子时段。

需要注意的是，关于限流强度的式（7-1）至式（7-3）所涉变量均与时间有关，它们均为对应时间（点）内的平均换算值。单个限流时段（30min）包含 10 个仿真间隔（ $\Delta t=3\text{min}$ ），考虑峰值进站量（即限流时段的最大粒度进站量）与仿真间隔内换算通行能力的均衡，通过式（7-1）至式（7-3）计算限流强度。

7.2 基于线路发车间隔缩减的输送能力增强

通勤高峰期间，常出现短时间内车站进站量大幅增加的情况，当列车发车间隔保持不变时，车站亦很可能形成客流积聚而出现高峰大客流。

本节在介绍行车调整常用措施的基础上，从提高输送能力（供给）的角度调整线路列车的发车间隔，对其进行理论上可行的缩减量分析，以期提高线路输送能力，减缓高峰大客流在网络中的扩散形势。

7.2.1 调整线路及时段确定

长时间维持低发车间隔将对大幅增加企业的运营成本，企业追求运营效益最大化的同时也格外关注成本控制。因此亦需确定重点线路和调整时段。本节将着眼于高峰期间高饱和和区间率的线路，缩减它们的发车间隔。某条线路的饱和和区间率为饱和区间占该线路区间总数的比例，见式（7-4）：

$$P_l^{\text{sat}}(t) = \frac{N_l^{\text{sat}}(t)}{N_l} \quad (7-4)$$

$P_l^{\text{sat}}(t)$ —— t 时刻线路 l 的饱和区间率； $N_l^{\text{sat}}(t)$ —— t 时刻线路 l 的饱和区间数； N_l ——线路 l 的区间总数。

低发车间隔的维持时间需要根据客流需求确定。考虑客流状态的网络通行能力以效率值为数值指标，能够从路网整体层面反映城市轨道交通系统的运营压力。本文以网络通行能力较低水平时段为对应的调整时段。

7.2.2 发车间隔缩减量推导

节点拥挤程度受输送能力和上下车人数的影响，此处暂时忽略时间变量，将拥挤程度更新变换为式（7-5）：

$$et_k = spr_{ik} - r_k = \frac{P}{c_k} \quad (7-5)$$

et_k ——节点 k 的拥挤程度； P ——与客流量有关的变量，本节假设其保持不变； c_k ——

—节点 k 的输送能力。

而节点输送能力在数值上等于其所属线路的输送能力，则有式 (7-6) 所示关系：

$$et_k = \frac{P}{c_k} = \frac{P}{c_j} \quad (7-6)$$

c_j ——节点 k 所属线路 j 的输送能力。

线路 j 的输送能力由发车间隔和列车定员人数共同决定。设发车间隔缩减量为 θ ，则调整后的输送能力为：

$$C'_j = \frac{\Delta t'}{(1-\theta)I_j} A_j \quad (7-7)$$

C'_j ——调整后线路 j 的输送能力； $\Delta t'$ ——某时间段，在后文实例计算时依然为仿真间隔 3min； I_j ——线路发车间隔； A_j ——线路 j 运营列车的定员人数。

缩减发车间隔的实际效用也体现在线路输送能力的提升。考虑到实际运营中最多允许列车超载 20%，故满足式 (7-8) 所示的关系：

$$C'_j \leq 1.2C_j \quad (7-8)$$

C_j ——线路 j 调整前输送能力。

将式 (7-7) 代入式 (7-8)，得到发车间隔缩减量：

$$\theta \leq 20\%$$

7.3 限流策略分析

7.3.1 识别危险车站

将最优聚类结果在二维平面坐标系可视化，如图 7-2 所示。横轴为早高峰进站系数，纵轴为早高峰进站闸机启用率。右上方图例为类别与颜色对应关系。

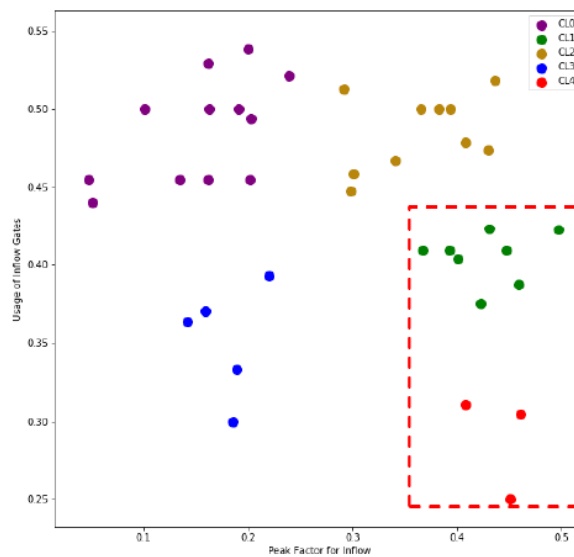


图 7-2 最优聚类结果的样本分布

整体来看，分布于平面图右侧区域（早高峰进站系数高）的车站节点呈拥挤态的可能性较高；而位于右下方区域（早高峰进站系数高且进站方向闸机启用率低）的车站节点的客流积聚可能性则尤为突出。

至此，初步识别了早高峰时段危险节点（红色虚线矩形框中），即上图中属于类别 1（绿色样本点）和类别 4（红色样本点）共 11 个车站，它们的客流高峰特征尤为明显。根据车站实际地理位置分布可知，这些车站大多为职住特征明显地区的非换乘站（9 站），分别为 1a、1f、1m、1o、1p、2b、2f、2q、2u。除此之外，还包括换乘站 1h(2k)。

7.3.2 限流策略优化效果对比分析

将采用两种方法处理后形成的基础数据分别代入递推模型进行仿真，并计算高峰时段网络客流状态评价指标与参考次仿真对比分析。

(1) 高峰大客流影响范围

在对危险车站进行限流后，仿真过程中呈拥挤态节点数量的最大值 20，即 $SI_1=20$ ，峰值时刻为 $t=19$ 、 $t=21$ 、 $t=29$ 。

对 1 号线和 2 号线于 7:30-8:30 时段进行发车间隔缩减，仿真过程中拥挤态节点数量的最大值为 23，即 $SI_2=23$ ，峰值时刻为 $t=19$ 。

对比分析各次仿真过程中网络的拥挤态节点数目随时间变化的关系，如图 7-3 所示。红色方块标记实线为参考次（未采取客流控制），灰色圆点标记实线为实行限流的情况（方法 1），黄色圆点标记实线为缩减发车间隔的情况（方法 2）。

缩减发车间隔对缩小高峰大客流影响范围有少许作用，效果并不明显，其仿真过程中大部分时刻拥挤态节点数与参考次一致。

对危险车站实行进站限流的优化效果则较明显。在 7:30-8:30 时段内，该方法对应的灰色圆点实线基本位于参考次红色方块实线的下方，这说明在此时段，对危险车站实行进站限流后高峰大客流并未在网络中广泛扩散。

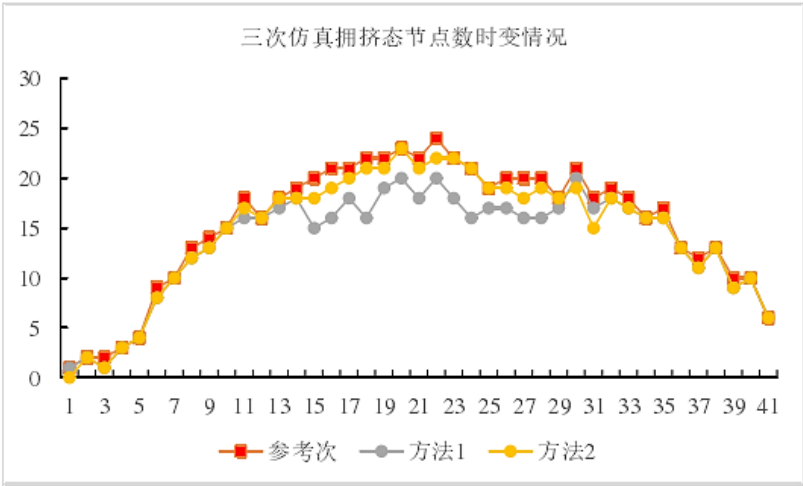


图 7-3 三次仿真拥挤态节点数随时间变化情况

分析采取不同控制方法仿真得到的高峰大客流影响范围差异（见表 7-1），以相对参考次的减少率表征优化效果。

表 7-1 高峰大客流影响范围优化对比

仿真次序	SI	优化效果	峰值时刻数
参考次	24	-	1

限流	20	16.7%	3
缩减发车间隔	23	4.2%	1

可见限流和缩减发车间隔均取得了一定效果。整体来看，限流对高峰大客流影响范围指标的优化效果较好，但会使峰值时刻数增加、路网客流状态负荷峰值时刻提前到来，因此具体执行时需要权衡考虑。

(2) 客流积聚易发程度

对危险车站进行限流后，得到客流积聚易发程度 $SI_1=14.76\sim 15$ ，即每个节点平均拥挤次数约 15 次。

对 1 号线和 2 号线进行发车间隔缩减后，得到客流积聚易发程度 $SI_2=15.81\sim 16$ ，即每个节点平均拥挤次数约 16 次。

早高峰期间，对 10 站进行限流后，网络中节点的拥挤态次数总计减少 71 次；对 1 号线和 2 号线在缩减 20%发车间隔的条件下，网络中节点拥挤态次数总计减少 31 次。对客流积聚易发程度而言，车站限流的优化效果好于缩减发车间隔。

(3) 考虑客流状态的网络通行能力

选取典型时刻，对比三者区间及车站的客流状态。从左往右依次为参考次、方法 1 车站限流、方法 2 缩减发车间隔。

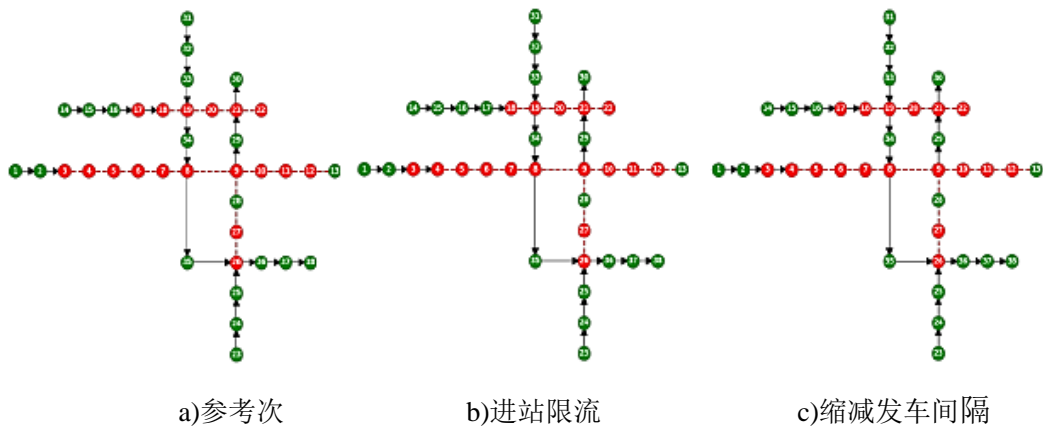


图 7-4 早高峰前期时刻 ($t=12$)

图 7-4 为早高峰前期某时刻，对应时间点 7:36。采取限流对节点拥挤态和饱和区间的抑制均有一定作用，如上图 b)；而缩减发车间隔亦可以在一定程度上疏解饱和区间，但对于拥挤态节点几乎没有疏解效果，如上图 c)。

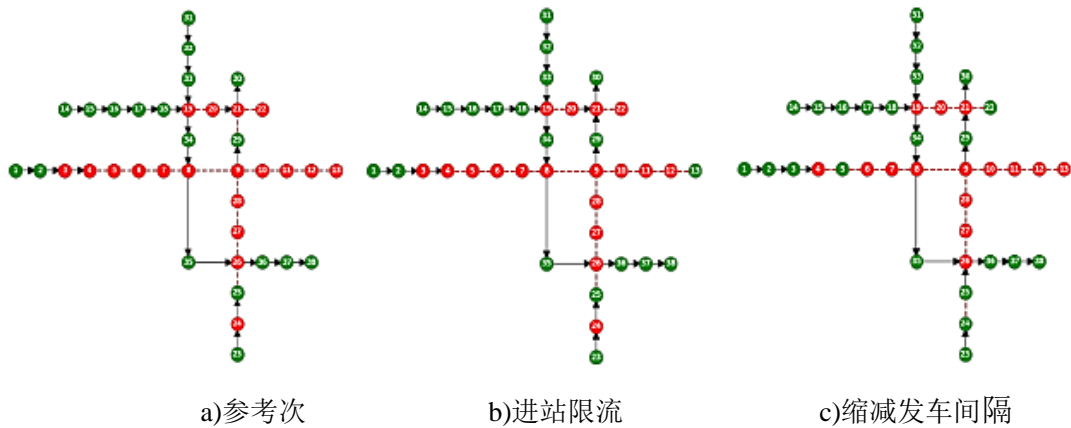


图 7-5 早高峰后期时刻 ($t=30$)

图 7-5 为早高峰后期某时刻，对应时间点 8:30。缩减发车间隔对路网中高峰大客流的疏解效果则较为明显，其拥挤态节点数和饱和区间数相比限流均有减少如上图 c)；限流方法在该时刻对高峰大客流的抑制仅体现在疏解少数饱和区间，如上图 b)。

可见限流对网络通行能力提升显著。计算各次仿真的网络通行能力平均值，以之与参考次的差异系数作为优化效果，见表 7-2。

表 7-2 网络通行能力优化效果对比

仿真次序	网络通行能力平均值	优化效果
参考次	0.061	-
进站限流	0.077	26.2%
缩减发车间隔	0.065	6.6%

整体看来，对于考虑客流状态的网络通行能力来说，对危险车站实施进站限流比缩减重点线路的发车间隔更能确保网络的整体畅通性，能够维持较高的服务水平。

八、问题四模型的建立与求解

8.1 协同地铁的常规公交优化模型

8.1.1 协同地铁的常规公交站间距优化模型

本文以旅客乘坐常规公交的总出行时间为优化目标，求解常规公交最优站间距。旅客常规公交的总出行时间车内乘坐时间和车外步行和候车时间。常规公交站间距缩小时，会缩短乘客的车外步行和候车时间，但会增加乘客车内乘坐时间。常规公交站间距增大时，会缩短乘客的车内乘坐时间，但会增加乘客的车外步行和候车时间。旅客乘坐常规公交的总出行时间随车站间距的变化关系如图 8-1 所示， D_A 为最优常规公交站间距。

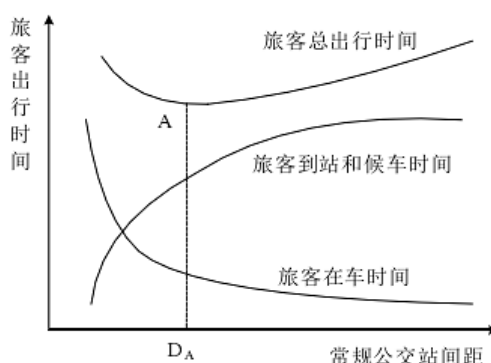


图 8-1 常规公交出行时间随车站间距的变化关系

本文探究的是协同地铁的常规公交最优站间距，因此只考虑出现换乘的情况对常规公交最优站间距的影响。常规公交与轨道交通之间换乘的表现形式主要有：常规公交换乘地铁、地铁换乘常规公交、常规公交换乘地铁再换乘常规公交。其中常规公交换乘地铁再换乘常规公交这一种换乘形式的比例很低，本文主要考虑前两种换乘形式。由于常规公交换乘地铁和地铁换乘常规公交这两种换乘方式只是出行的次序不同，不会影响城市居民的总出行时间，因此只研究一种换乘形式。第一种换乘形式的旅客总出行时间包括旅客步行至常规公交站的时间、常规公交的候车时间、常规公交的在车时间、换乘地铁的步行时间、地铁的候车时间、地铁的在车时间、有地铁站点步行至最终目的地的时

间，各段时间如图 8-2 所示。

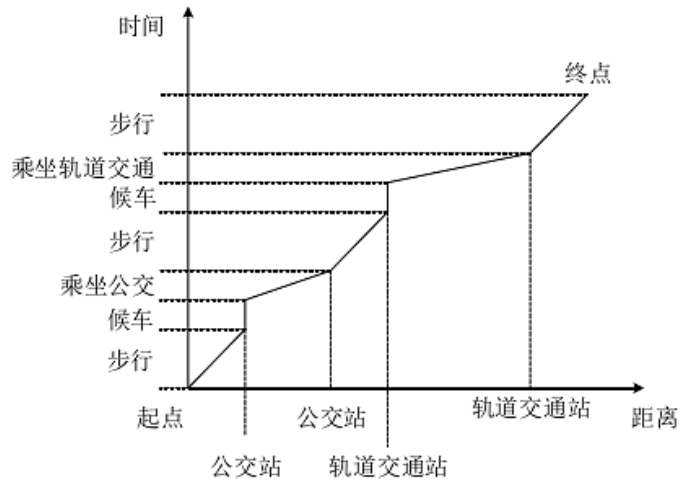


图 8-2 常规公交换乘地铁各段时间示意图

协同地铁的常规公交最优站间距目标函数为：

$$\begin{aligned}
 \min T &= \min \sum_{i=1}^7 T_i \\
 &= \min \left\{ L_r P_r \left(\frac{L_{pb}}{V_{\text{步}}} + T_{wb} \right) + (G_b^2 + H_b^2) \frac{P_b n_b}{2V_{\text{步}}} + L_r P_r \left(\frac{L_{cb}}{V_b} + \frac{L_{cb}}{l_b} T_{sb} \right) \right. \\
 &\quad \left. + L_r P_r \left(\frac{L_{pr}}{V_{\text{步}}} + T_{wr} \right) + (G_r^2 + H_r^2) \frac{P_r n_r}{2V_{\text{步}}} + L_r P_r \left(\frac{L_{cr}}{V_r} + \frac{L_{cr}}{l_r} T_{sr} \right) \right. \\
 &\quad \left. + L_r P_r \frac{L_{pr}}{V_{\text{步}}} + (G_r^2 + H_r^2) \frac{P_r n_r}{2V_{\text{步}}} \right\} \quad (8-1)
 \end{aligned}$$

将的 G_b 、 H_b 、 G_r 、 H_r 代入(8-1)式，然后分别对 l_b 、 l_r 求偏导，同时令 $\frac{\partial T}{\partial l_b} = 0$ ， $\frac{\partial T}{\partial l_r} = 0$ 可得最优站间距为：

$$\begin{cases} l_b = \sqrt{\frac{x_1^2 + 4L_{cb}T_{sb}V_{\text{步}}}{1 + y_1^2}} \\ l_r = \sqrt{\frac{x_2^2 + 4L_{cr}T_{sr}V_{\text{步}}}{1 + y_2^2}} \end{cases}$$

其中： $x_1 = (d_{ab} + d_{bb})y_1 + T_{sb}V_{\text{步}}$ ， $y_1 = \frac{V_{\text{步}}}{V_b}$ ， $x_2 = (d_{ar} + d_{br})y_2 + T_{sr}V_{\text{步}}$ ， $y_2 = \frac{V_{\text{步}}}{V_r}$

计算参数为：其中平均乘车距离 $L_{cg} = 2500m$ ，平均垂直距离 $L_{cd} = 6050m$ ，列车正常行驶速度 $V_d = 50km/h$ ，列车加减速速度 A_{ag} 、 $A_{bg} = 1m/s^2$ ，接驳速度 $V_b = 1.22m/s$ ，地铁停站时间 $t_s = 45s$ ，常规公交停站时间 $t_{s'} = 30s$ 。

8.1.2 协同城市地铁的新增接运常规公交线网调整

在城市公共交通系统中，接运公交是常规地面公交系统的一部分，是专门与地铁共

同组成轨道交通接运公交系统。我们都知道，地铁的建设投资非常的大、建设周期长，要形成完善的轨道交通网络需要很长时间，因此常规公交对轨道交通的客流吸引十分重要。在我国以常规公交换乘地铁为主，因此，接运公交线网是轨道交通客流效益的重要保障。

协同地铁交通的常规接运公交线网调整应以接运效率最大为目标，接运公交线网调整的前提有：

- (1) 地铁线路确定并已知；
- (2) 旅客出行需求 O-D 量已知；
- (3) 地铁直接吸引客流量与线路客流限制已知。

接运公交线网的调整通常采用逐条选线法和路线推荐法，具体如下：

(1) 逐条选线法:每次选择一个最优备选接运站点，根据接运效率最大的原则搜索一条连接该站点的最优接运公交线路。然后调整地铁及接运公交的客流矩阵及旅客出行需求 O-D 矩阵，然后进行下一条最优接运公交线路的选择，在此基础上，直到最后线网内也无备选的接运公交站点及线路，最后工作都完成之后所选取的接运公交线路为调整的接运公交线网。

(2) 路线推荐法:首先根据各备选接运公交站点分别搜索若干条最优接运公交线路作为推荐接运线路，再由规划者依据实际情况酌情选取组成常规接运公交线网。

8.2.常规公交站间距调整

8.2.1 站间距调整参数

本文以前几个问题的理论为依据，结合地铁和常规公交的实际情况对式中的参数取值，取值归总如下表 8-1。

表 8-1 最优站间距参数取值

参数	值	参数	值
L_{cg}	2500m	L_{cd}	6050m
t_s	45s	$t_{s'}$	30s
D_{ag} 、 d_{bg}	3.84m	d_{ag} 、 d_{bg}	96.45m
A_{ag} 、 a_{ag}	2.5m/s	a_{ad} 、 a_{bd}	1m/s
V_g	4.17m/s	V_d	50km/h
V_b	1.22m/s	—	—

由此可以求得， $L_g=716m$ ， $L_d =994m$ 。也就是说，呼和浩特市内和地铁线配合的常规公交线路的最佳站间距 716m，还有地铁的最佳站间距为 994m，在此基础上，然后与呼和浩特市地铁线的实际平均站间距 986m 大体一致，可以考虑作为参考依据。

8.2.2 间距调整建议

新华广场以东公交重合轨道站点多达 15 个，且与呼和浩特市地铁 1 号线部分站点重合，现状的站间距是 573 米，与最优站间距有较大差距，是地铁重要的换乘协调线路。其站点与站间距情况如下表 8-2 所示

表 8-2 新华广场以东公交站间距情况

站点	新华广场	1	2	3	4	5
----	------	---	---	---	---	---

站间距 (m)	0	350	582	320	751	280
站点	6	7	8	9	10	11
站间距 (m)	263	416	325	338	511	561
站点	12	13	14	15	16	市政府
站间距 (m)	759	342	380	334	810	362

根据站间距调整的原则，在此基础之上考虑到与呼和浩特市地铁 1、2 线衔接等因素，加上新华广场以东公交线路过长，沿线公交站点密布，建议取消 3、5、6 这几个站点，并能使其更好的为地铁 1 号线集散客流。而且在此基础之上，公交线路经过调整后的与地铁沿线平均站间距为 627m，较优化调整前与地铁 1 号线更加匹配，图 8-3 为新华广场以东公交路线走向图。



图 8-3 新华广场以东公交路线走向图

8.3 公交线网调整

公交线路的优化调整一定程度上对缓解地铁线路交通压力有着很大的帮助，出站和进站乘客在选择出行换乘方式上也更加的灵活，提高了出行效率。本文在模型分析的基础上，对呼和浩特市公交辅助地铁出行的线路进行了优化和调整，共规划了三条新的公交线路方案，如下图 8-3、8-4 和 8-5 所示。



图 8-3 新增公园公交线路

新增的公园公交线路从新华广场出发，沿北行驶一段路程后向东沿路行驶，直达团结公园，再向北行驶，终点站设在成吉思汗公园附近。新增的公园公交线路有利于缓解 1 号线向东出行和换乘的压力，同时便捷了出行乘客的目的地选择方案。



图 8-4 新增大学城公交线路

新增大学城公交线路，从新华广场出发，先向东行驶，再紧接着路口右转，转向内蒙古大学方向继续行驶，后途径内蒙古农业大学和内蒙古国际蒙医医院，再向南行驶，到达兴安南路站，终点站在银联大厦。整条线路途径大学，医院等人员密集集聚地，对缓解地铁 1、2 号线贡献突出。



图 8-5 新增 2 号线西侧沿线公交线路

对于 2 号线的西侧，其不是市中心和繁华地带，仅设有地铁 1 号线原则上是能够满足出行要求的，但为了缓解 2 号线全线的乘客流通量，可在 2 号线的西侧，沿线设置一条公交线路。公交线路的起始点位于西城公园，途径青城公园，终点站设在五里营附近。

九、模型的评价及优化

9.1 模型的评价

(1) 对于问题 1，首先建立了以乘客等待时间最小为优化目标的单一交路开行方案模型，设置了满载率约束、追踪间隔约束、折返作业时间约束和停站时间约束。而后针对于以上模型，设计了求解的遗传算法。最后得到了优化后列车行驶的时刻表，对列车的满载率变化进行了分析，对比分析了乘客等候时间的变化。

(2) 对于问题 2, 建立了车站选取的覆盖量模型与费用效益模型, 通过覆盖量模型能够对地铁站点路线的人口覆盖程度进行分析, 结合费用效益模型对路线站点布设进行检验, 从而得到效益影响下的地铁最优站距与站点布设方案。

(3) 对于问题 3, 首先对高峰大客流控制方法进行了研究, 提出了限流强度计算模型和限流时段的确定方法。而后又对基于线路发车间隔缩减输送能力增强的方案进行了研究, 分析了调整线路及时段确定的方法。最后通过最优聚类结果对危险车站进行了识别, 分别运用以上两种方法对危险车站的限流效率进行了分析, 依据分析结果对高峰限流措施提出建议。

(4) 对于问题 4, 通过分析常规公交出行时间随车站间距的变化关系, 建立了协同地铁的常规公交站间距优化模型, 并对协同城市地铁的新增接运常规公交线网调整方法进行了分析, 设置了站间距调整参数, 对模型进行了求解。依据求解的结果, 对新华广场以东公交站间距进行了优化, 删除了不必要的 3 个站点。增设了 3 条新线路, 用于协调不同区域人员高峰出行时期的出行效率, 分别为新增公园公交线路、新增大学城公交线路和新增 2 号线西侧沿线公交线路。

9.2 模型的优点

(1) 在研究城市轨道交通客流特征的基础上, 以断面客流数据为基础, 以乘客的等待时间最小为优化目标, 同时控制满载率水平、以列车容量, 最小停站时间, 最小区间运行时间, 列车到发时间间隔, 列车折返时间间隔等因素对其进行约束。在满足约束条件的基础上, 合理地分配列车在各个车站的停站时间与在各个区间的运行时间, 在单一交路与大小交路两种不同的开行方案下, 构建考虑服务水平城市轨道交通列车时刻表优化模型。运用 MATLAB 编写程序, 并选择采用群智能优化算法-遗传算法进行求解。

(2) 本文提出了高峰大客流控制方法: 进站限流、发车间隔缩减, 并以数值计算为核心分别将其应用于原实例客流数据的预处理阶段, 在早高峰时间, 对危险车站进行限流对高峰大客流的抑制效果好于缩减重点线路的发车间隔。

9.3 模型的缺点

(1) 本文在研究时主要考虑单一线路上的客流需求, 在乘客服务水平的方面, 没有考虑到乘客的总在车时间、换乘便捷度以及本线路时刻表与其他线路时刻表的衔接以及网络化运营需要考虑的其他因素。

(2) 本文模型的应用实例均为局部轨道交通网络, 且由于数据获取限制将部分换乘站视为非换乘站。

9.4 模型的推广

本文所建立的模型及算法结构清晰而简单, 实用性强, 对于中小城市地铁运营与建设优化设计问题, 能够可靠的反应结果, 其模型也可以用于解决其他相关性问题。在探索利用模型算法来解决中小城市地铁运营与建设优化设计问题方面, 对计算出合理可行的站点选址方案具有非常重要的现实意义。

参考文献

- [1] 林禹童,曹成铉,柳雨彤,冯紫嫣.基于客流需求的列车时刻表和车底调度协同优化[J].山东科学,2020,33(02):63-70.
- [2] 刘斌,乐北晨,字俊奇,张腾飞.武汉轨道交通香港路站换乘客流的流线优化设计[J].城市轨道交通研究,2021,24(04):45-49.
- [3] MATLAB 数学建模方法与实践 卓金武.王鸿钧 北京:北京航空航天大学出版社,2018.6
- [4] 张鹏,俞亦舟.城市轨道交通线路与站点规划理论研究[J].科技信息,2012(30):144-145.
- [5] 杨月琴.城市轨道交通线路及站点规划探讨[J].广东蚕业,2017,51(05):23.
- [6] 杨丽辉.城市常规公交与轨道交通协调发展的策略思考[J].工程技术研究,2021,6(07):248-249.
- [7] 沙金硕.城市轨道交通线路选线设计思路探究[J].铁道建筑技术,2021(04):48-51.
- [8] 任艳军. 城市地铁与常规公交的协同研究[D].长安大学,2019.
- [9] 卫星佩,吴桐. 城市轨道交通换乘候车时间最优化方法研究[A]. 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会.品质交通与协同共治——2019 年中国城市交通规划年会论文集[C].中国城市规划学会城市交通规划学术委员会:中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院,2019:10.
- [10] 商攀. 城市轨道交通系统客流状态估计及运营组织优化研究[D].清华大学,2019.
- [11] 数学建模算法与应用 司守奎.孙兆亮 北京: 国防工业出版社,2015.4 ISBN 978-7-118-10037-2.
- [12] 姚向明. 城市轨道交通网络动态客流分布及协同流入控制理论与方法[D].北京交通大学,2015.
- [13] 胡路,蒲云,蒋阳升,朱娟秀,陈彦如.城市轨道交通车站到达客流时间间隔分布拟合[J].系统工程理论与实践,2014,34(07):1835-1846.