基于客流量对地铁线路的规划与运营

摘要

针对问题一，首先，将附件3进行数据预处理，将线路A从多线路中进行分离，然后，对线路A中的不同站点进行分离，再将每个站点中的乘客分为进站和出站两类进行分析。其次，分别建立回归预测模型进行分析，得出分析结果，**67站点第9小时结果为730.233**，再用**指数平滑法模型**通过已知数据对未来一小时内人流量进行预测比较，趋势平缓的站点运用**一次平滑指数法**，呈现二元曲线的站点运用**三次平滑指数法**预测。最后，运用时间预测模型，**可得出67、68、69等站点后一小时的人流量分别为237、8946、410.6等**。

针对问题二，首先，对附件2和附件3的数据进行处理，通过一天的人流量来判断出地铁的高峰期为**每天的7:00-8:59**，设置出发车时间间隔来避免高峰期的拥堵。其次，基于人流量运用**粒子群优化算法**对发车时间间隔进行优化，不考虑特殊情况，在高峰期缩短发车的时间间隔，最后，运用Matlab进行数据处理，计算出优化后的结果，经过计算后得出，在高峰期时**将发车的时间间隔改为3分40秒**就会避免拥堵。

针对问题三，首先，对轨道交通和接运公交的技术经济特性分析进行分析，比较得出轨道交通的优势，然后，考虑轨道交通选取的因素，建立轨道站点选取模型，分析需要被接运的公交服务的轨道站点，最后，通过计算客流周转量确定站点选取的标准，建立**聚集效应函数模型**，确定轨道站点合理的接运范围，若地铁晚高峰的客流量为7019人，最低换乘人流比率为85%，最接近的换乘距离就为$\boldsymbol{2.5km}$，可以据此根据公交站点设置新增地铁站点。

关键词：指数平滑预测；粒子群优化算法；聚集效应函数模型；轨道线路规划

一、问题重述

1.1 问题背景

随着我国城市化进程的加快，客流需求急剧攀升。同时我国社会经济不断发展，铁路交通运输系统已经成为我国交通运输的一大主力，以交通便捷，覆盖范围广，票价低廉等优势占据出行市场，相较于以前，人们更愿意选择公共交通方式出行。铁路运行系统在为人们生活带来便利的同时，大流量的客运也为交通运输系统带来了巨大的压力。因此，各地铁站人流量的预测和管理显得尤为重要。为保证乘客的满意度，本文以杭州交通运输系统为例统计各地铁路线的人流量和各公交车站的发车时间，然后经过数学建模运算，对杭州的交通运输体系提出改进意见，做到合理调配工作人员安排和最大程度保障乘客的出行。

1.2 问题提出

（1）通过整理附件 3 中的数据，将预测 A 线一小时内的人流量变化；

（2）收集数据，分析人流量，确定人群乘坐早晚高峰，合理调整杭州公交车发车时间间隔，最大程度避免拥堵；

（3）通过分析附件 2 中的乘客上下车数据和人流量的关系，计算最合理的新增地铁线路。

二、问题分析

针对问题一：首先，将附件 3 进行数据预处理，将线路 A 进行分离，然后，对线路 A 中的不同站点进行分离，再将每个站点中的乘客分为进出站两类进行分析。其次，分别建立回归预测模型和指数平滑法模型通过已知数据对未来一小时内人流量进行预测比较，得出分析结果。最后，对二者的预测精度进行比较，在实际预测中可以选择更精确的方法。

针对问题二：首先，对附件 2 和附件 3 的数据进行处理，通过一天的人流量来判断出地铁的高峰期，设置出发车时间间隔来避免高峰期的拥堵。其次，基于人流量运用粒子群优化算法对发车时间间隔进行优化，不考虑特殊情况，在高峰期缩短发车的时间间隔，最后，运用 Matlab 进行数据处理，计算出优化后的结果。

针对问题三：首先，对轨道交通和接运公交的技术经济特性分析进行分析，比较得出轨道交通的优势，然后，考虑轨道交通选取的因素，建立轨道站点选取模型，分析需要被接运的公交服务的轨道站点，最后，通过计算客流周转量确定站点选取的标准，建立聚集效应函数模型，确定轨道站点合理的接运范围。

三、模型假设

1、假设在设计线路时，不考虑城市空间建设

2、假设车辆发车的时间间隔不变，在沿途各站停车时间固定不变。

3、假设站台与站台之间车辆的运行速度是恒定的，并且在中途无特殊事件发生。

4、假设三条地铁在运行时不会相互影响。

四、定义与符号说明

符号	定义说明
$Y_{预测小时流量t}$	预测小时人流量
X_{t-1}	相邻前一小时人流总量
X_{t-2}	相邻前第二小时人流总量
β_1 β_2 β_3	回归系数
$T_{\min}$	最小发车时间间隔
$T_{\max}$	最大发车时间间隔
C_1	地铁交通系统总消耗成本
C_0	地铁运营成本
C_2	乘客出行成本

五、问题分析与求解

5.1 问题一的分析与求解

作为城市建设的基础设施，地铁的产生与发展对城市生活产生了巨大影响，对于人们日常出行提供了极大的便利，缩短日常出门通勤时间，减少空气污染。随着科技的进步，对地铁轨道交通需求的增加，对于轨道交通的速度和管理也提出了更高的要。对于地铁站点的人流量合理控制和便捷性需要用更客观的统计方法，进行更高效和准确的计算，增加轨道交通的便捷性和舒适性。本文对杭州地铁 A 线路的进出站人流量分别进行分析，有利于站台规范管理、提高人们出行效率。现阶段可查研究表明，进行地铁站小时人流量预测研究较少[1]，而再有特殊情况，如：需紧急疏散、临时改换乘、早晚高峰等情况下，小时性研究有更强的实践性和提供更全面的安全保障。本文以杭州地铁交通为例，建立数学模型，以小时性数据进行预测，得出未来一小时的人流量数据，为轨道交通预测工作提供依据。

5.1.1 数据预处理

由于附件 3，2019 年 1 月 21 日杭州市各地铁站 24 小时内的人流量数据已经经过脱敏处理，无法直接与线路和站点对应，所以本论文通过 Excel 对附件三进

行简单的处理。首先利用高级筛选等操作将 A 线路各站点的用户分别开来，A 线路各站点在 1 月 21 日这天的人流量如下图所示。

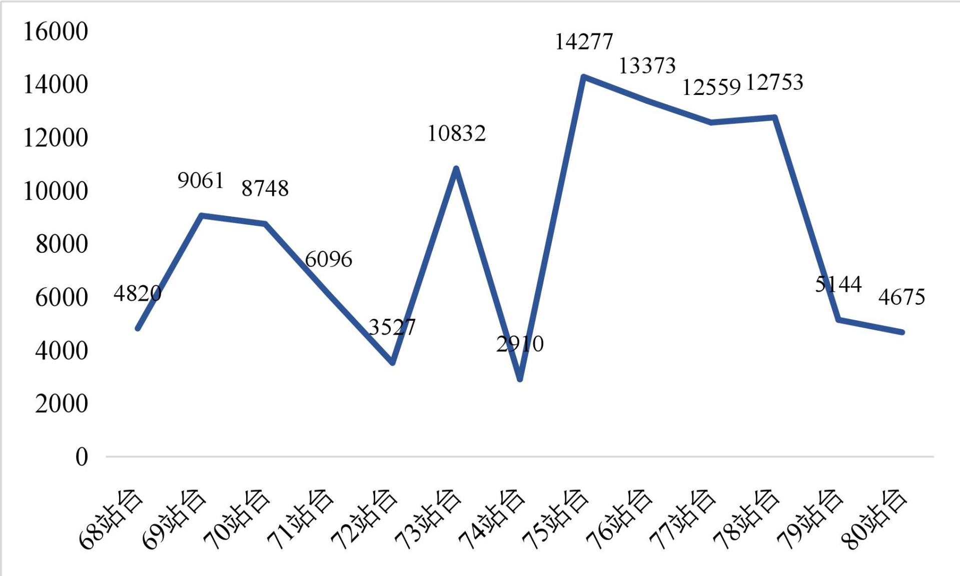

图 1　A 线路人流量

根据附件内容，将人流量分为进站人流量与出站人流量，各站进站人流量与出站人流量如下图所示。

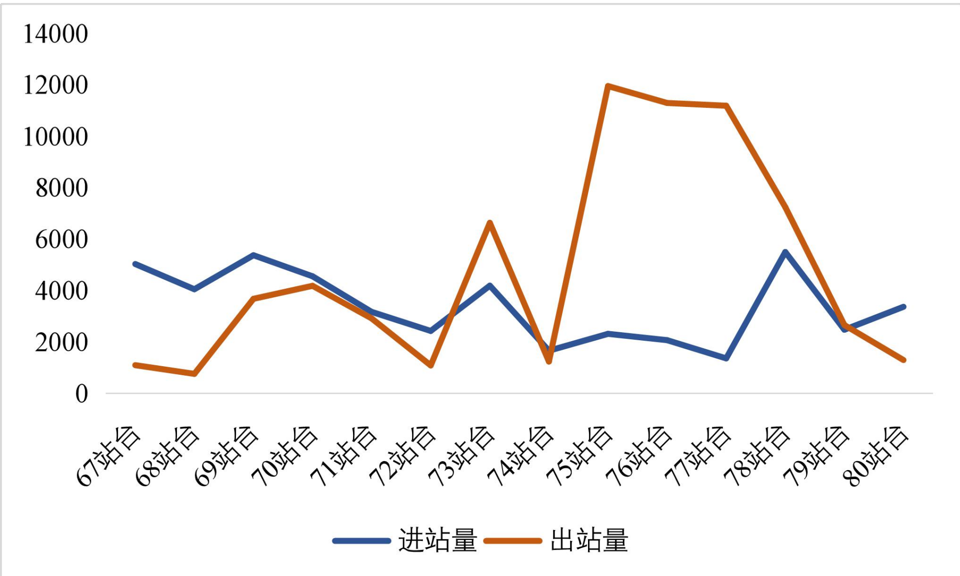

图 2 进出站人流量

5.1.2 A 线路各站点进站人流量预测

本问题预测为定量预测，在此初步选用回归分析方法、时间序列分析法[2]两种方法，对比分析后择其中较为精确者作为本问预测分析法，提升本问预测精确度。

5.1.3 回归预测

由于问题求解为一小时的人流量，所以此选取二元线性回归模型，以相邻小

时的人流量作为自变量进行回归拟合。

$$Y_{预测小时流量t}=\beta_1 X_{t\text{-}1}+\beta_2 X_{t-2}+\beta_0 \tag{1}$$

对于 67 站点的进站人流量，使用软件 SPSS 进行分析得：

表 1 线性回归分析结果图

线性回归分析结果 (n=6)									
	非标准化系数	标准化系数		t	p	VIF	R^2	调整 R^2	F
	B	标准误	Beta						
常数	838.113	502.206	-	1.669	0.194	-			
$67x_1$	0.568	0.456	0.534	1.245	0.301	1.110	0.503	0.171	F (2,3)=1.517,p=0.351
$67x_2$	-0.683	0.441	-0.664	-1.548	0.219	1.110			

从上表可知，将 $67x_1,67x_2$ 作为自变量，而将 67 站点实际作为因变量进行线性回归分析，从上表可以看出，模型公式为：

$$67站点实际=838.113+0.568*67x_1-0.683*67x_2$$

模型 R 方值为 0.503，意味着 $67x_1,67x_2$ 可以解释 67 站点实际的 50.3% 变化原因。

$$第9个小时客流量=838.113+0.568*166-0.683*296=730.233$$

对模型进行F检验时发现模型并没有通过F检验($F=1.517$，$p=0.351>0.05$)，也即说明 $67x_1,67x_2$ 并不会对 67 站点实际产生影响关系，因而不能具体分析自变量对于因变量的影响关系，所以本题不采用回归分析。

5.1.4 指数平滑法

由附件 3 中的时间间隔统计人流量，以一小时为单位，运用时间序列方法，

以时间指标对 2019 年 1 月 21 日的人流量进行统计分析，对实际数与预测数进行加权，使离已知实际越近的预测数权数较重，以此由近及远递减。

对于 A 号线的各站点的进站人流量趋势散点拟合图如下图所示。

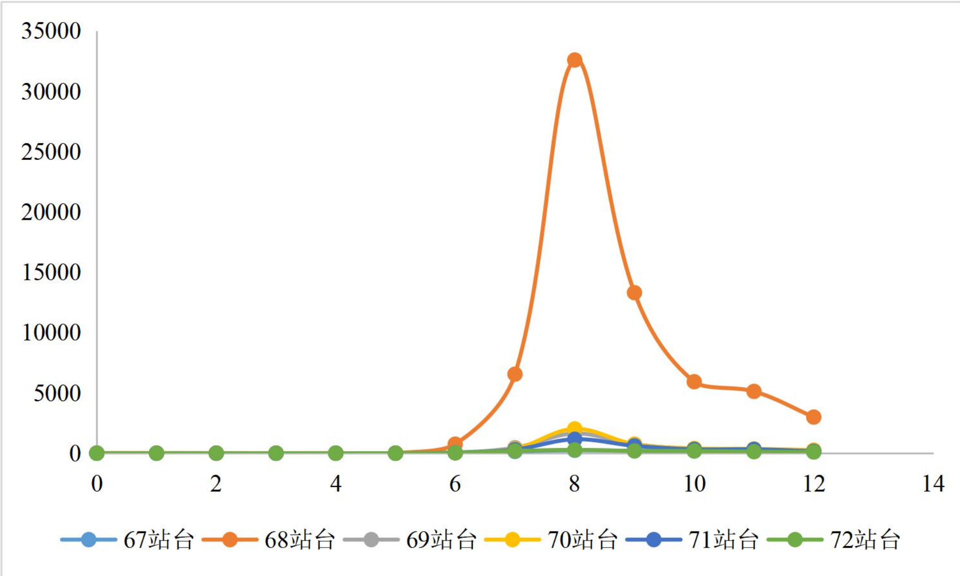

图 3 进站人流量趋势图

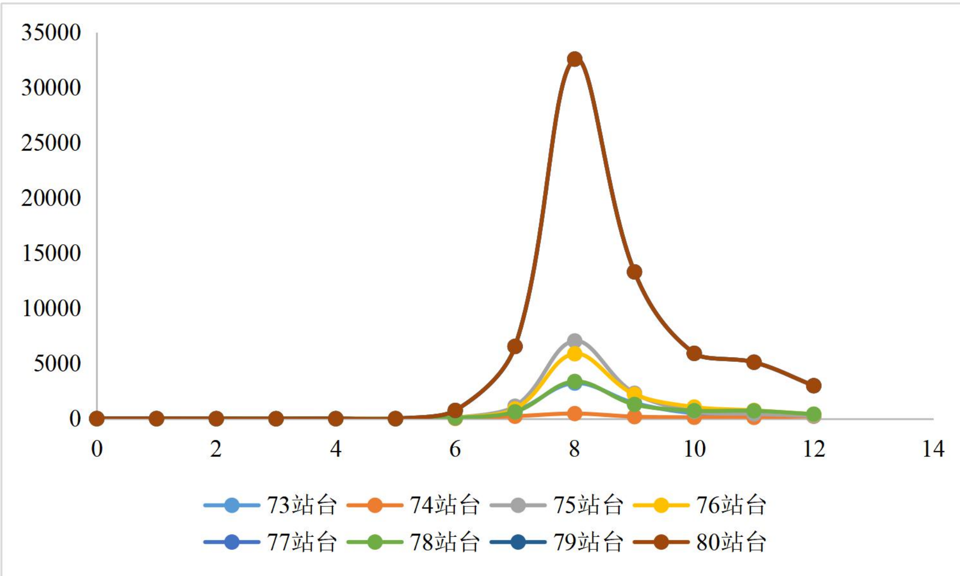

图 4 进站人流量趋势图

由趋势图所示，75、76、78、79、67、69、70、72、73、74 这 10 个站点，在时间序列中无明显波动起伏,所以在此采用一次指数平滑法进行预测,其平滑系数取 0.2,以 67 为例。

公式如下：

$$s_i = \alpha \cdot x_i + (1-\alpha) \cdot s_{i-1} \tag{2}$$

$$x_{i+h} = s_i \tag{3}$$

$$
\begin{aligned}
s_i &= \alpha x_i + (1-\alpha)s_{i-1} \\
&= \alpha x_i + (1-\alpha)[\alpha x_{i-1} + (1-\alpha)s_{i-2}] \\
&= \alpha[x_i + (1-\alpha)x_{i-1} + (1-\alpha)^2 x_{i-2} + (1-\alpha)^3 s_{i-3}] \\
&= \cdots \\
&= \alpha\sum_{j=0}^{i}(1-\alpha)^j x_{i-j}
\end{aligned} \tag{4}
$$

$$
y'_{t-1} = ay_t + (1-a)y'_t \tag{5}
$$

表 2　进站人流量

时间序号	1	2	3	4	5	6	7	8
67 站点进站人流量	33	319	1527	1880	495	320	296	166

在时间序号 1-8 的情境下，67 站点进站人流量。

$$
S_0^{(1)} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \tag{6}
$$

$$
S_1^{(1)} = \alpha y_1 + (1-\alpha)S_0^{(1)} \tag{7}
$$

$$
S_2^{(1)} = \alpha y_2 + (1-\alpha)S_1^{(1)} \tag{8}
$$

依次类推求得$\alpha = 0.1$，$\alpha = 0.2$，$\alpha = 0.3$ 运用一次平滑指数法，计算出平滑值，将最早的三个数据的平均值设为初始值。

表 3　67 站点进站人流量

时间序号	1	2	3	4	5	6	7	8
67 站点进站人流量	33	319	1527	1880	495	320	296	166
0.1	567	542.2	640.68	764.612	737.6508	695.8857	655.8971	606.9074
0.2	507.6667	469.9333	681.3467	921.0773	835.8619	732.6895	645.3516	549.4813
0.3	448.33	409.53	744.77	1085.3	908.23	731.76	601.03	470.5

	33	33	33	41	89	73	71	26

按照上表可根据第 8 个 1 小时对应的 606.90、549.4813、470.526 可以分别根据公式来预测第 9 个月的销售量。

以$\alpha = 0.3$ 为例：$y_9 = 0.3 * 166 + (1 - 0.3) * 470.526 = 379.1682$（人）

相比之下，对于站台 67，用一次指数平滑预测较为精确。

对于站台 77、80、68、71 变化类似二元曲线，运用三次平滑指数预测，

$$S_t^{(3)} = \alpha S_t^{(2)} + (1-\alpha) S_{t-1}^{(3)} \tag{9}$$

三次平滑法的预测模型为：

$$\hat{y}_{t+T} = a_t + b_t T + c_t T^2 \tag{10}$$

$$a_t = 3S_t^{(1)} - 3S_t^{(2)} + S_t^{(3)} \tag{11}$$

$$b_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2}\left[(6-5\alpha)S_t^{(1)} - 2(5-4\alpha)S_t^{(2)} + (4-3\alpha)S_t^{(3)}\right] \tag{12}$$

$$c_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2}\left[S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)}\right] \tag{13}$$

以站台 77 为例，2019 年 1 月 21 日进站人流量如下表所示：

表 4　77 站点进站人流量

时间序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12
77 站点进站人流量	28	15	2	2	8	197	2558	65536	15311	6121	4653	4850	3089

利用 MATLAB 运行预测结果为，

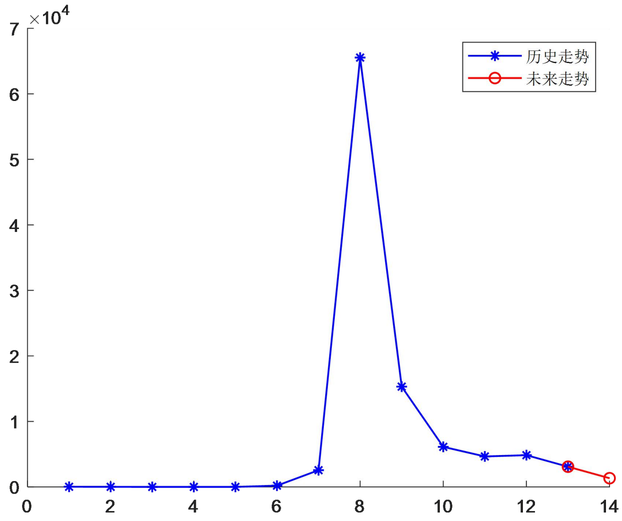

图 5 预测结果图

从 77 站点进站人流量三次指数平滑预测图观察，从时间序号 1-6 可以看到进站人流量变化较缓，从 7-8 开始呈现急剧上升，从 8-10 呈现急剧下降，从 11-12 变换较缓，13-14 时间序号为预测结果，可以看到人数较少。

同理，80、68、71 站台的三次指数平滑预测图为

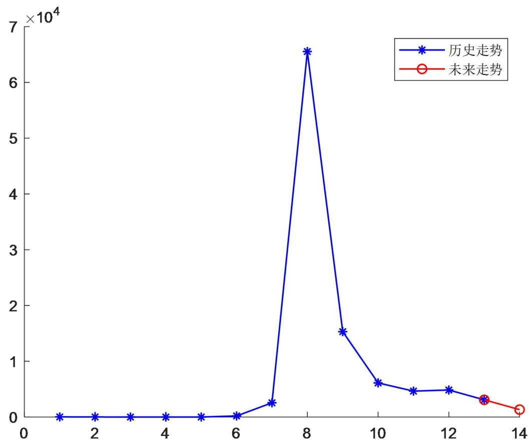

图 6 80 站台预测图

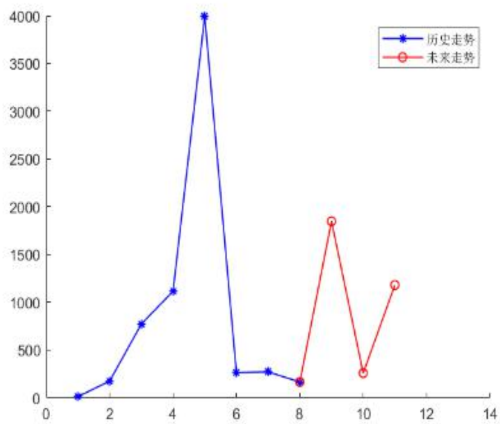

图 7 71 站台预测图

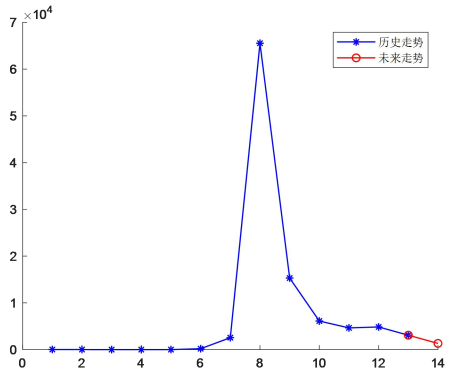

图 8 68 站点预测图

从 80、71、68 号站点分别进行预测分析，可以看到只有 71 号站点人数变化波动较大，80 和 68 号站点变化跟随不同时间序号人流量的变化趋于平缓。

5.1.5 A 线路各站点出站人流量预测

针对出站人流量，由于数据特点，运用时间预测模型，力求使得出站人流量精确度更高。

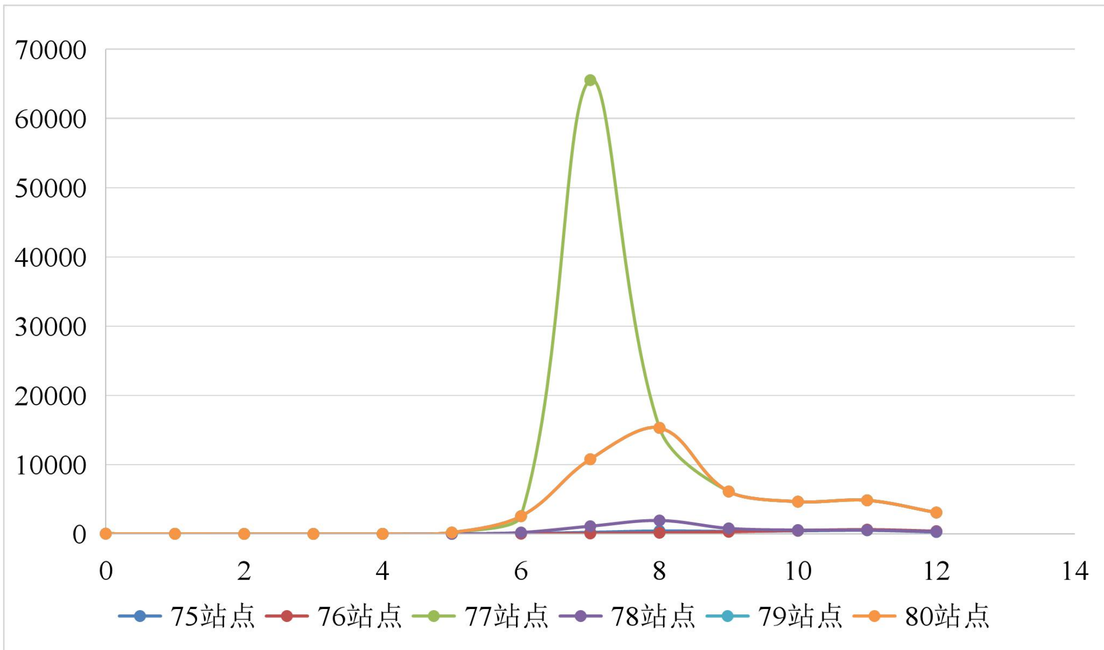

图 9 站点人数图

表 5 预测结果表

时间	67站台	68站台	69站台	70站台	71站台	72站台	73站台	74站台	75站台	76站台	77站台	78站台	79站台	80站台
预测的下一小时	237	8946	410.6	471.3	459.8	8946	1036	162.4	653.7	1613	8946	1167	8946	8946

5.2 问题二的分析与求解

5.2.1 客流量分析

如图 10、11、12 是 A 线（1 号线）、B 线（2 号线）、C 线（4 号线）2019 年 1 月 21 日的客流量图，从全天的流量图可以看出，在 7:00-8:59 时间段是乘客量最大的时间段，这个时间段是人们早晨上班的时间，在其余时间段内的客流量比较平稳，起伏不大，可见这段时间是早高峰时期。

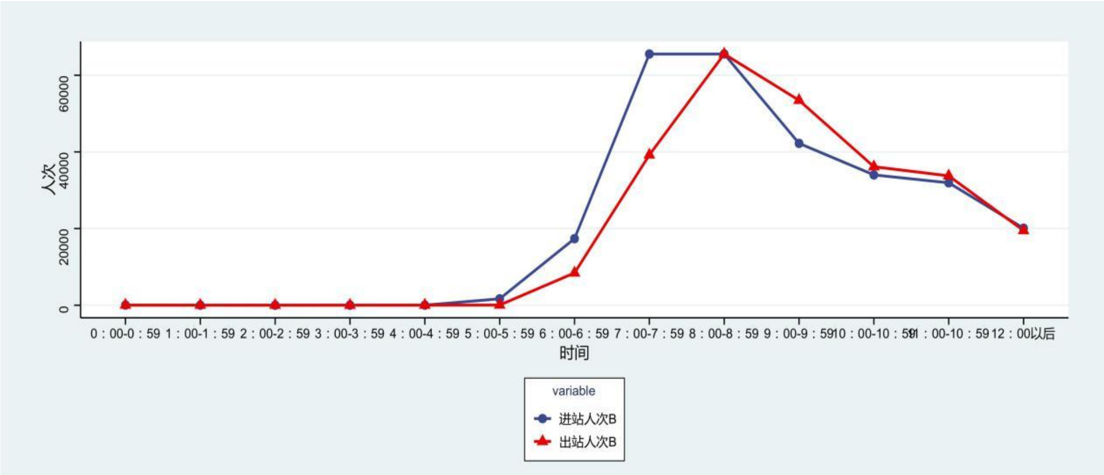

图 10　A 线高峰趋势图

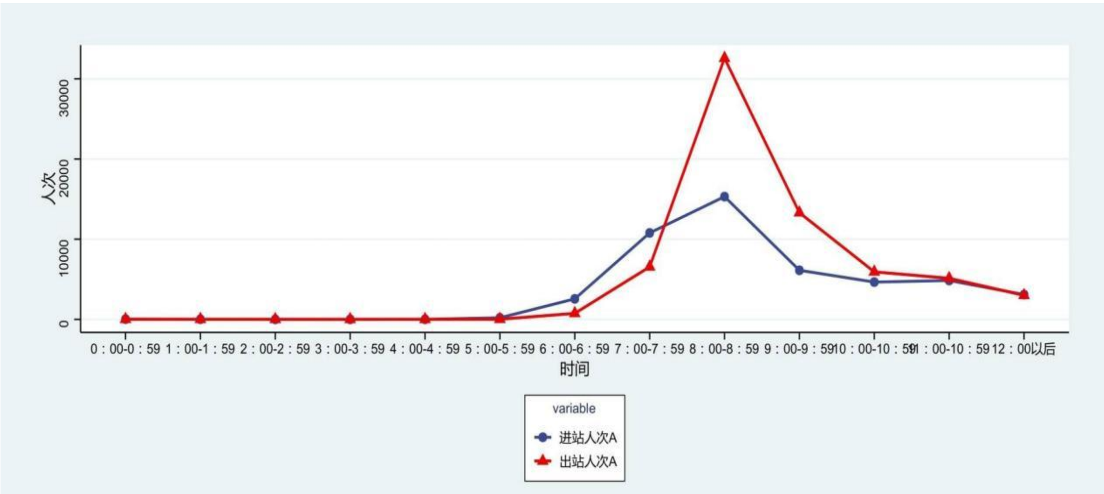

图 11　B 线高峰图

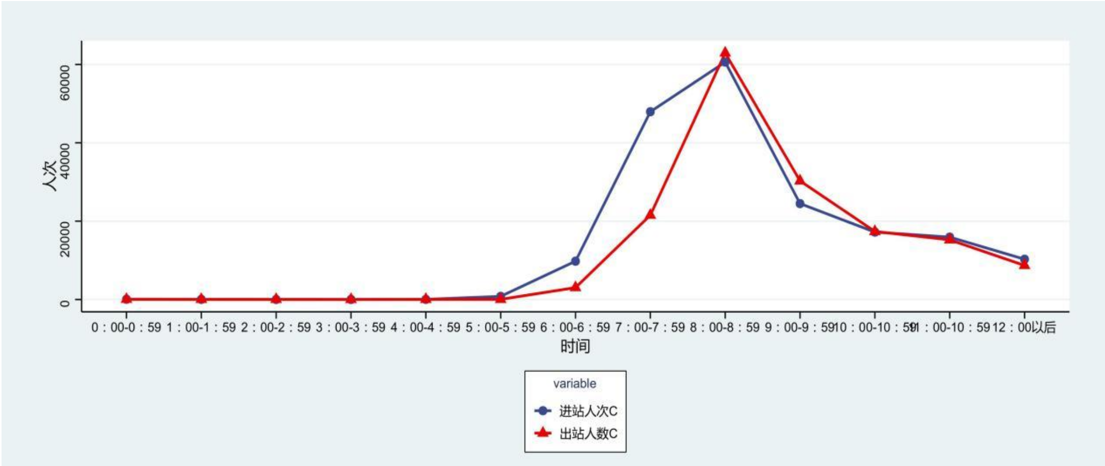

图 12　C 线高峰图

5.2.2 地铁发车间隔优化模型构建

（1）以 A 线（1 号线）、B 线（2 号线）、C 线（4 号线）三条地铁为实例。

（2）在同一时间段内，相邻两列地铁的发车间隔相等。

（3）地铁按照调度表准时进站和出站，并且地铁速度恒定，途中没有任何意外事故。

（4）最小的时间单位是分钟。

（5）地铁为同一类型地铁，在使用过程中不会增加额外的成本。

（6）票价为标准票价，不计算在乘客的出行成本之内。

地铁交通系统成本包括了两部分，分别是地铁运营成本和乘客出行成本。

总消耗成本函数为：

$$C_1 = \alpha C_0 + \beta C_2 \tag{14}$$

C_1 是地铁交通系统总消耗成本，C_0 是地铁运营成本，C_2 是乘客出行成本，α 是运营成本的权重系数，β 是乘客出行成本的权重系数，且 $\alpha + \beta = 1$。

5.2.3 约束条件

（1）$\text{平均满载率} = \dfrac{\text{客运量}}{\text{车辆定员} \times \text{车次}} \times 100\%$

（2）最大、最小发车间隔

相邻两车的发车间隔率应该满足附件 2 中最大、最小发车间隔的约束，即：

$$T_{\min} \le \Delta t \le T_{\max} \tag{15}$$

$T_{\min}$ 是最小发车时间间隔，$T_{\max}$ 是最大发车时间间隔。

（3）任意相邻两车的发车时间间隔差

要保证发车时刻的连续性，所以相邻两车的发车时间间隔差不应该太大。

5.3.4 建立粒子群优化算法设置高峰期发车时间间隔

（1）控制算法参数

从附件 3 可得出，是通过地铁的刷卡设备获取了乘客的进出站交易记录，以 2019 年 1 月 21 日杭州市 A 线（1 号线）5：54 至 24：00、B 线（2 号线）6：08 至 24：00、C 线（4 号线）6：08 至 23：33 的三条地铁的人流量数据为基础，验证粒子群算法对于解决杭州市地铁高峰期的发车间隔问题的有效性。

（2）线路的相关信息

通过查询发现三条线路的发车间隔时间分别为：A 线（1 号线）最大是 8 分 30 秒,最小是 2 分 15 秒，全程总共有 34 个站。B 线（2 号线）最大是 5 分 50 秒，最小是 2 分 15 秒，全程总共有 23 个站。C 线（4 号线）最大是 5 分 50 秒，最小是 2 分 30 秒，全程总共 10 个站。

（3）划分时段

线路一天运营的时间大约为 18 小时，把每一个小时划分为一个时段。

（4）其他有关信息

地铁运营成本加权系数 α 和乘客出行成本加权系数 β 相等，$\alpha+\beta$=1，高峰期时段是 7:00-8:59，所以在其他时段 $\alpha=\beta$=0.5。

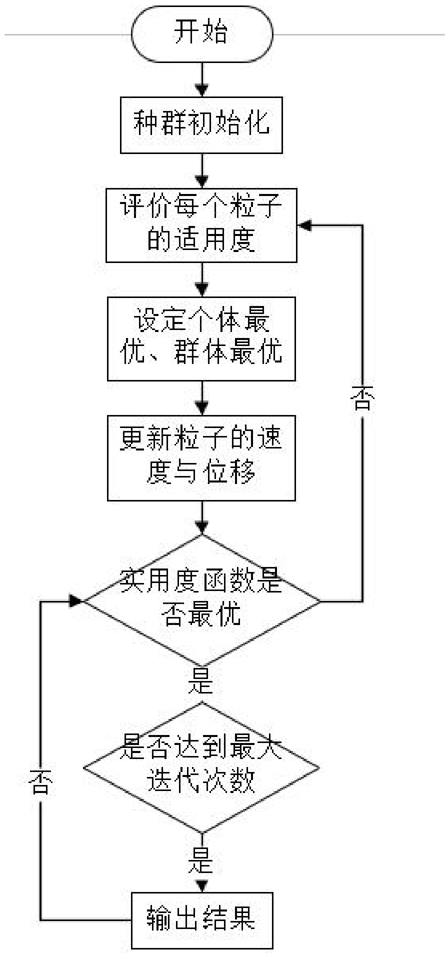

图 13 运营流程图

（5）参数控制

粒子规模 N：N=20

粒子维度 D：D=3

学习因子 c1,c2：c1=1.5，c2=1.5

迭代次数 T：T=50

惯性权重 w=0.8

5.2.5 运用 Matlab 对优化程序计算

运用 Matlab 对优化程序进行计算，得出的结果如下：

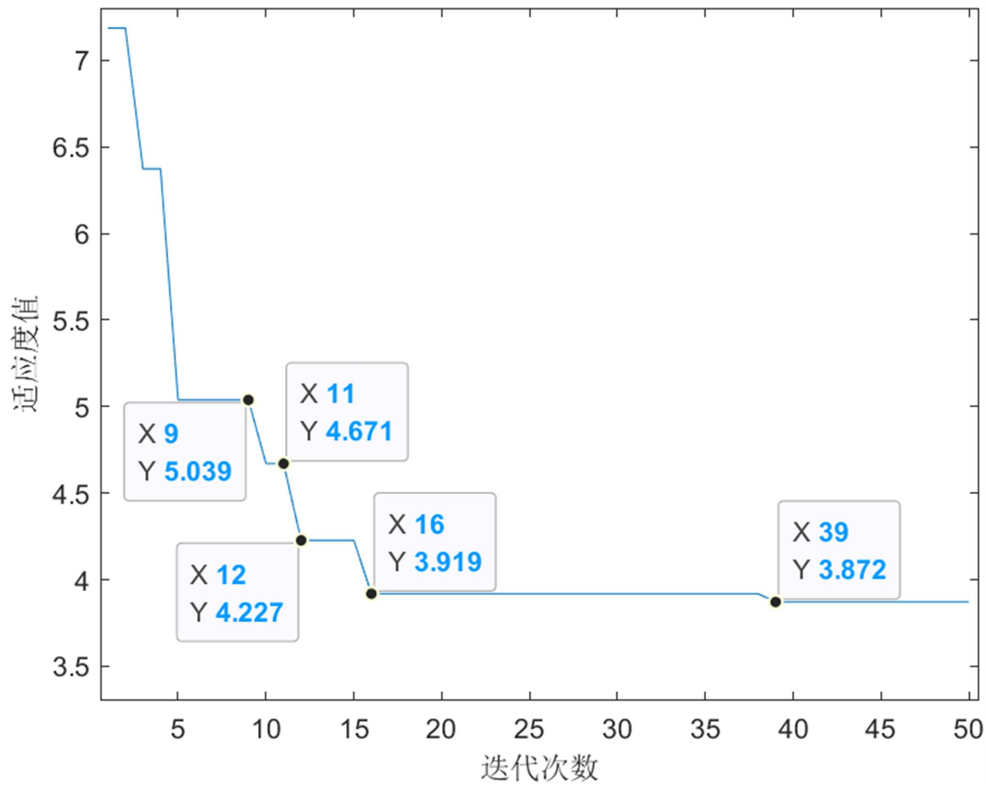

图 14 适应度进化曲线

表 6 发车时间表

时段	0：00-0：59	1：00-1：59	2：00-2：59	3：00-3：59	4：00-4：59
发车间隔	8 分 30 秒	8 分 30 秒	8 分 30 秒	8 分 30 秒	8 分 30 秒
时段	5：00-5：59	6：00-6：59	7：00-7：59	8：00-8：59	9：00-9：59
发车间隔	7 分 15 秒	6 分 20 秒	3 分 40 秒	3 分 40 秒	4 分 10 秒
时段	10：00-10：59	11：00-11：59	12：00 以后		
发车间隔	4 分 25 秒	5 分 5 秒	6 分 15 秒		

经过优化后得出的结果在高峰期的发车间隔时间大约为 3 分 40 秒。

5.3 问题三的分析与求解

5.3.1 技术经济特性分析

本文对公交与轨道交通的协调发展进行论述，分析二者特性与共同点有利于建立完整的交通系统，为出行实现最大便捷性与节省经济最大化。

（1）成本效益

成本效益是进行一项城市基本建设的必然考虑，是管理者和决策者进行方案比较时的重要参考依据，通过阅读文献和查找参考资料，得到两种交通方式的具体指标，进行成本效益比较。

表 7　成本效益表

衡量指标	轨道交通	接运公交
平均每公里造价（亿元/km)	6-9	<0.5
客运运输量（万人/h）	4-7	1-2
规划到建设时间（年）	4-5	1
工期时长（年）	8-10	1-2
协调灵活性	低	高

从表中可以看到，轨道交通需求量大，但造价高、建设时间长、协调灵活性低，相较之下，公交的造价低，规划时间短，协调灵活性高，体现出地面交通方式的优势性。

（2）运输能力

交通工具的运输性对于运行者来说也是重要的参考指标，对于乘客来说出行效率与花费时间是是否选择这种交通工具的依据，，下表进行二者运输能力的比较。

表 8　运输能力表

衡量指标	轨道交通	接运公交
输送速度（km/h）	30-45	20-35
单项运能（万人次/h）	4-6	0.5-0.8

从表中可以看到，从输送速度和单项运能量相对比，轨道交通的输送能力远超过公交的能力，优势明显，是集聚速度快，运输能力强，效率高的一项交通方式。

（3）能耗成本

自国家十三五计划以来，轨道交通的发展得到了极大重视，其中绿色环保，对环境污染程度小是政府对其的重要考虑因素，再进行城市基建时应该考虑到环境污染指标与各种能源的消耗。

表 9　能耗成本表

衡量指标	轨道交通	接运公交
能耗(kj/人*km)	422.4	744.8
废气排放比	0.8	1
CO_2 g/(人*km)	4.8	20.4
NO_2 g/(人*km)	0.18	0.50
SO_2 g/(人*km)	0.01	0.14
道路占用率	低	高

从表中可以看到轨道交通在节能减排实现了巨大的超越，是普通公交的一半左右，同时废气排放率低，二氧化碳和二氧化硫是造成温室效应和空气污染的主要污染气体，轨道交通能够将其降低，且道路占用率低，从而提高路网的使用率。

5.3.2 地铁与公交线路可视化

将附件 1 与附件 2 中公交站点线路与地铁站点线路运用专业软件可视化，

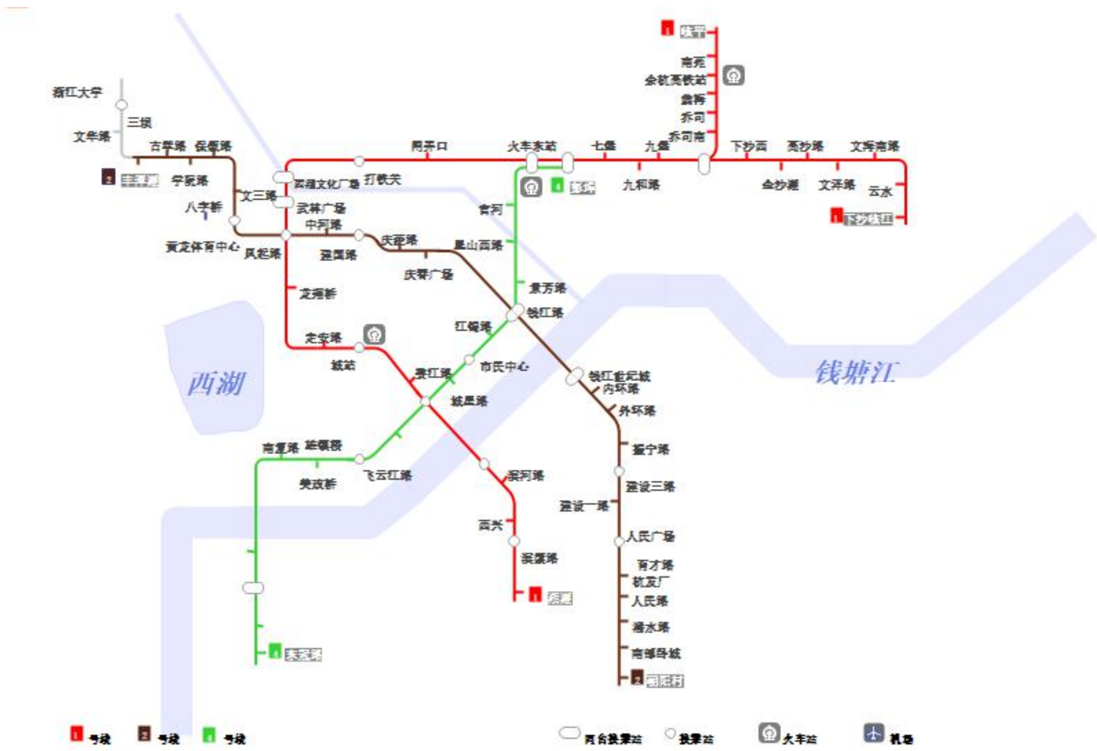

图 15　地铁 1、2、4 号线

5.3.3 轨道交通站点选取研究分析

对轨道交通的站点选取的合理性至关重要，并不是每一个公交车站点都适合选择为轨道交通的站点，由于轨道交通具备独特的高运输能力，高效率能力，所以设置的站点应该是集散点和客流量发生较大的位置，因此，经过计算选择合适的站点可以有效地对人群进行分流，缓解地面交通运输压力，同时能够确定合理的捷运范围，为更多的居民进行服务。

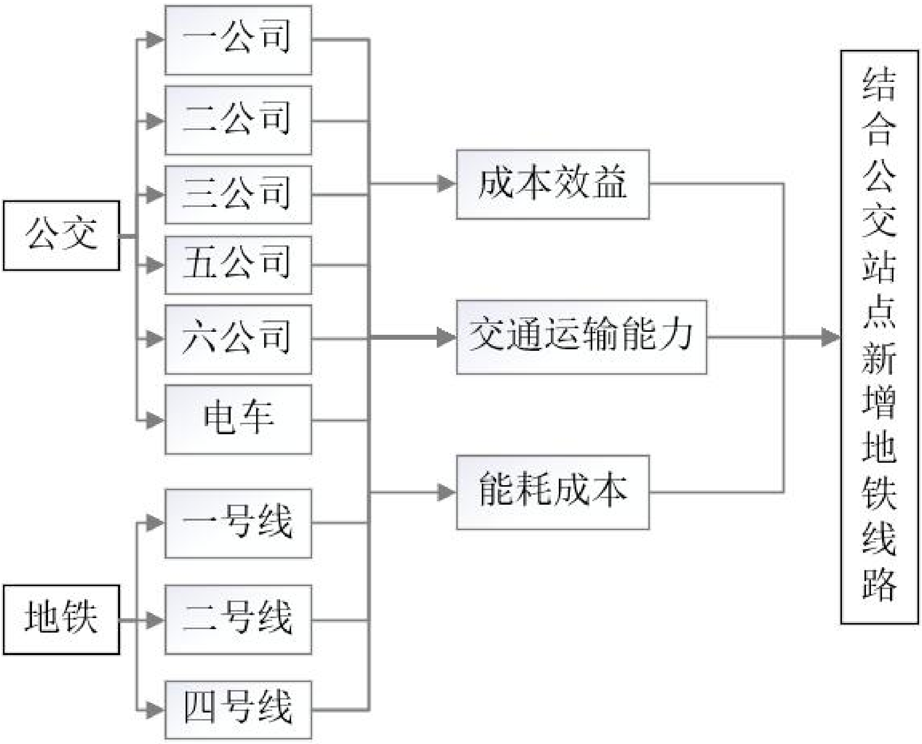

图 16　新增站点流程图

1、轨道交通站点的分类

不同的轨道站点的设置应该依据不同站点的特色，例如地理位置的不同，周边开发情况的不同和附近车站规模的大小等因素进行分类。在本文中，按照轨道交通在交通网络系统中的地理位置和功能的不同进行分类，主要分为轨道交通运输综合枢纽车站和常规车站。

（1）综合枢纽车站具有辐射范围广、换乘规模大，客流分布集中等特点，通常设置在城市的对外进出口处，与此类车站接驳的公交车线路呈现放射状，数量可以达到十条以上，对综合枢纽车站进行布局时，要考虑到多种交通工具的接驳情况，进行综合分析时，通常采用空间立体化衔接等方式进行合理分流，保证在换乘中人们的安全。

（2）常规车站一般指轨道交通线路中间的站点，主要作用就是服务于地铁与公交之间的换乘与集散，一般布设在设区的中心，方便人们步行到达，进入市中心进行换乘。

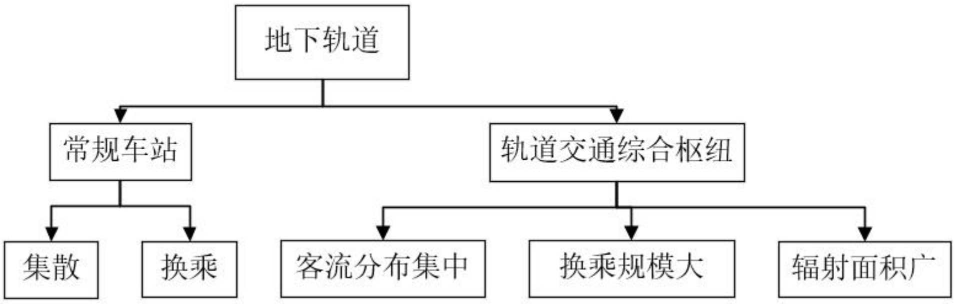

图 17　轨道交通站点分类图

2、　轨道交通站点选取的因素

（1）客流强度：在选取地铁站点时，客流量应该达到一定的标准，综合具体类型的轨道站点，客流的分布和需求量在空间和地理上存在巨大的差异。对于商业发达、就业人数多的地方人流量更大，就是考虑设点的地方。

（2）政府规划：在进行城市地铁基建时必然考虑到城市的规划问题，规划的目标就是紧跟城市的发展目标由于需求，使地铁规划能够实现长期使用。所以政府在进行地铁规划时必然考虑到站点周边资源，可能会使用站点的开发带动周边的发展策略。

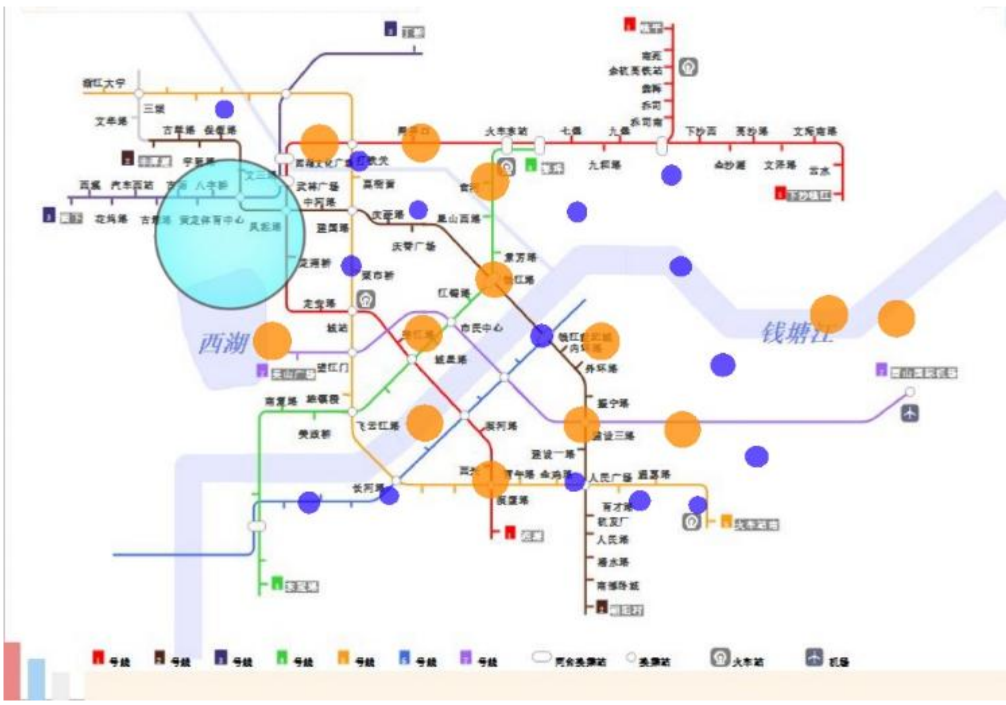

图 18　地铁站点释义图

3、　轨道交通站点选取的模型方法分析

地铁作为城市轨道交通中最重要的交通方式，主要承担远距离运输功能，如果出行者乘坐公交车，在轨道交通接运点选择换乘，在地铁的乘行距离小于公交车上的乘行距离，那么无论在出行时间成本或者经济成本都是不划算的。在本文中，按照客流周转量进行选取，接运客流周转量即被地铁接运的客流量与其在地

铁乘行距离的乘积[3]。在其他条件相同的情况下，尽可能选取客流周转量多的站点作为地铁交通转运点。

乘客在轨道站点的客流总体分为站点 S 的上下客流量，主要包括两部分：直接上下客流量和剩余上下客流量[4]。设轨道站点 S 的剩余下课量为$Q_{剩下}\left[S\right]$,剩余上客量$Q_{剩上}\left[S\right]$。

假设从 X 个轨道站点中选取 i 个接运站点即：

$$Z = \max\left\{R_x \middle| R_s\right\} \tag{16}$$

其中，Z 表示目标函数及选择的轨道站点集合； R_x 和 R_s 表示轨道站点接运客流量， $X = 1,2,\cdots,i, S = 1,2,\cdots,x$ 。

轨道站点 S_n 到 S_{n+1} 的接云客流量为：

$$T[S_{\mathrm{n}}, S_{\mathrm{n+1}}] = \max\left\{\min T_{[K,K+1]}, Q_{剩下}[S], Q_{剩上}[S]\right\} \tag{17}$$

其中$\left(S_n < S_{n+1}, k \in S_n\right)$

轨道交通站点 S_n 到 S_{n+1} 的接驳周转量为：

$$R_{[S_n,S_{n+1}]} = T_{[S_n,S_{n+1}]} \times D_{[S_n,S_{n+1}]} \tag{18}$$

对于轨道交通站点 S 当剩余上下客流量比较低的时候，这样导致接运公交的接运量少，不能产生其本身的设置效果，对地铁也没有太大的意义，所以说并不是所有的轨道交通站点都会被选择为接运点。需要满足一定的条件：

$$R_x = \sum_{[S_n,S_{n+1}]} R_{[S_n,S_{n+1}]} \geq C_{s1} \tag{19}$$

$$Q_{剩下}\left[S\right] + Q_{剩下}\left[S\right] \geq C_{s2} \tag{20}$$

从公式 18 中可以看出，地铁最大的客流量周转量是指站点 S 到其他轨道站点间的剩余客流周转量之和[3]，首先应该按照距离站点 S 最远的站点进行求和，然后进行轨道线路上客流周转量的调整，进而在计算距离站点 S 次元的站点间的剩余客流量计算，依次循环计算直到计算到站点 S 。

5.3.4 轨道交通接运服务范围分析

城市轨道交通点的接运区域，是指该点的辐射范围对客流的吸引区域，它通常以轨道交通点为圆心，以乘客通过其他交通方式到达该站点的空间距离为半径的圆形区域。

本文从物理学公式角度考虑，轨道交通是一个效应点，会产生一定的聚集效应梯度场[5]，类似于磁场，随着距离的增大，梯度场的效应会减弱，呈现从中心向边缘递减。结合衰减公式，表示公式为：

$$f(e)=\alpha\ln\frac{\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-e^2}}{e}\mp\sqrt{\alpha^2-e^2} \tag{21}$$

其中 E 表示梯度效应场，可以根据实际的需求来变形替换。其中α为参数，具体意义是集聚效应取得最大的时候。

对于上述强e换一种度量方式，首先假设轨道交通的服务半径为d，那么在d的范围内轨道接运站点的客流占客流生成的百分比为θ，接着就可以确定客流的梯度效应场为$e=1-\theta$，对于轨道站点步行到接运公交的距离设为d_0，此时对于d_0范围以外的$\alpha=100\%$，通过以上参数确定，可以得到站点的聚焦效应应随距离的增大的聚焦模型的目标函数如下：

$$d=f(\theta)=\lambda(\alpha\ln\frac{\alpha+\sqrt{\alpha^2-(100-\theta)^2}}{100-\theta})+d_0 \tag{22}$$

$$q_{ij}=O_i\times\frac{D_j\times f(T_{ij})}{\sum_j D_j\times f(T_{ij})} \tag{23}$$

$$f(T_{ij})=\frac{1}{f(T_{ij})} \tag{24}$$

$$f(T_{ij})=e_{ij}^{-\beta} \tag{25}$$

公式 23 表示距离与需求的衰减函数，公式 23 中λ和d_0都是正参数，可以通过样本回归得到。公式 24 中表示单约束重力模型，表明换乘时间与客流的关系。公式 25 表示阻抗函数，其中T_{ij}表示交通时间阻抗函数，β表示参数，O_i表示轨道站点的高峰下客流量，D_j表示吸引客流量与就业土地性质有关，f是与时间费用T_y负相关的函数，接下来就是如何确定θ的数值，对于乘客从轨道交通站点下车以后，需要考虑乘客的换乘工具。

5.2.4 站点选取模型分析

以公交站点为例，设i为地铁站点，j_1~ j_8都为公交站点的质心如下图所示。

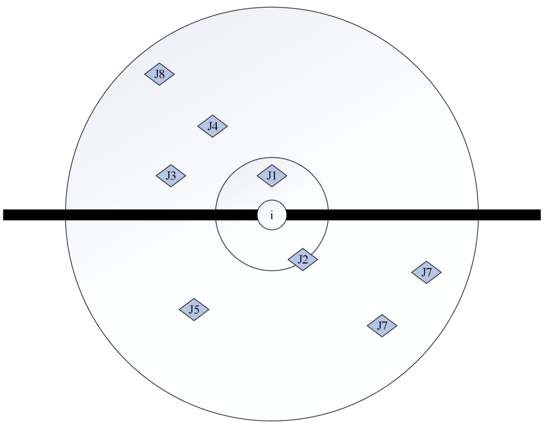

图 19　站点选取图

以单约束重力模型公式计算各个公交站点的进站出站人流量，假设地铁晚高峰的客流量为 7019 人。

表 10　时间与客流量表

衡量指标	步行					接运公交		
路线	$i\to j_1$	$i\to j_2$	$i\to j_3$	$i\to j_4$	$i\to j_5$	$i\to j_6$	$i\to j_7$	$i\to j_8$
路程距离/km	0.4	1	1.5	3	5	6.5	8	9.5
时间/min	4	10	20	25	30	35	40	50
站点客流/人	23.5	270	425	350	200	100	50	25
换乘客流/人	3117	1432	1127	742	353	151	66	26

根据各个换乘站点的人流量，根据距离由近及远排序，根据样本拟合聚集效应函数系数。将相邻站点的距离均值作为d的输入值，

$$\theta_j = \frac{\sum_{j=1} q_{ij}}{Q_i} \tag{26}$$

就此运用 MATLAB 等软件得出d内的换乘人流量占地铁总人流量的百分比，将其命名为θ，具体参数值如下表所示。

表 11 聚集效应函数输入的样本数据

d/km	0.7	1.25	2.25	4	5.75	7.25	8.75
θ	44.40	64.80	80.87	91.44	98.62	99.56	99.93

表 12 聚集效应函数参数拟合结果

指标	λ_0	d_0	SSE	R-square	RMSE
数值	0.0038	0.4381	0.9300	0.9190	0.438

将上述参数结合公式，得到聚集效应函数，如下

$$d = f(\theta) = 0.0038\left(100\ln\frac{100+\sqrt{100^2-(100-\theta)^2}}{100-\theta} - \sqrt{100^2-(100-\theta)^2}\right) - 0.4381 \tag{27}$$

得到的拟合曲线如下图所示。所以如若最低换乘人流比率为 85%，最接近的换乘距离为 $2.5km$，可以根据此计算公交站点新增为地铁站点的服务范围。

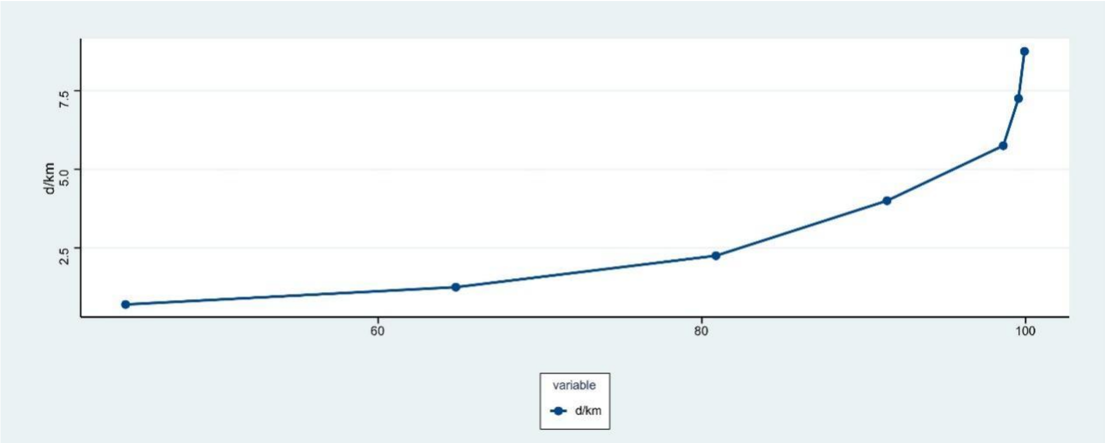

图 20 参数拟合的函数图像

六、模型评价

6.1 模型的优点

1、指数平滑法对于数据的需求量小，计算出的预测值更贴合实际，而且操作简单还容易理解。

2、线性回归计算较为简单，计算出的值是唯一值，使得结果更加有效，更加符合实际。

3、粒子群优化算法属于迭代的优化算法，没有较多的参数需要调整，简单易实现。

6.2 模型的缺点

1、指数平滑法需求如果发生突变将无法进行预测，只适合用于短期预测，不适合用于长期预测，而且数据只来源于历史数据，具有局限性。

2、线性回归因为是属于一种推测，所以会有不可测性以及在某些情况下会受到一定的限制。

3、粒子群优化算法在选择遗传算子的时候比较麻烦，在解决某些问题的时候性能上不是很好。

6.3 模型的推广

1、指数平滑法适合对于成熟产品的需求进行预测。

2、线性回归可以运用在资源的最优化分配中，也可以进行相关分析，从而确定现象之间的密切程度及因果关系。

3、粒子群优化算法目前已在函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法的领域中被广泛使用。

七、参考文献

[1] 徐吉谦.轨道交通客流量预测的浅见[J].地铁与轻轨,1997(03):27-28.

[2] 单傲. 多变量时间序列数据预测模型的研究和实现[D].北京邮电大学,2020.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.003001.

[3] 蒋冰蕾,孙爱充.城市快速轨道交通接运公交路线网规划[J].系统工程理论与实践,1998(03):131-135+140.

[4] 薛行健. 城市轨道交通接运公交线网优化研究[D].长沙理工大学,2008.

[5] 唐奇. 基于轨道交通的接运公交站点选取及接运线网优化研究[D].西南交通大学,2012.

八、附件

问题一的三次指数平滑预测：

```
clear
clc
S=[13
176
773
1116
3994
265
272
166];
figure
hold on
plot(S,'b-*','linewidth',1);
alpha=0.5;
beta=0.5;
gamma=0.3;
fc=3;%预测个数
```

```
k=3;%初始取均值数据个数
n=length(S);
a(1)=sum(S(1:k))/k;
b(1)=(sum(S(k+1:2*k))-sum(S(1:k)))/k;
s=S(1)-a(1);
y=a(1)+b(1)+s(1);
for i=1:n+fc-1
    if i==length(S)
        S(i+1)=a(end)+b(end)+s(end-k+1);
    end
    a(i+1)=alpha*(S(i)-s(i))+(1-alpha)*(a(i)+b(i));
    b(i+1)=beta*(a(i+1)-a(i))+(1-beta)*b(i);%趋势
    s(i+1)=gamma*(S(i)-a(i)-b(i))+(1-gamma)*s(i);%周期
    y(i+1)=a(i+1)+b(i+1)+s(i+1);
end
plot(n:n+fc,S(end-fc:end),'r-o','linewidth',1);
legend('历史走势','未来走势')
xlim([0,14])
```

问题二：

```
clear all;
close all;
clc;
N=20;                          %群体粒子个数
D=3;                           %粒子维数
T=50;                          %最大迭代次数
c1=1.5;                         %学习因子 1
c2=1.5;                         %学习因子 2
w=0.8;                          %惯性权重
Xmax=4;                        %位置最大值
Xmin=1;                        %位置最小值
Vmax=5;                        %速度最大值
Vmin=-5;                       %速度最小值
%初始化个体
x=rand(N,D)*(Xmax-Xmin)+Xmin;
v=rand(N,D)*(Vmax-Vmin)+Vmin;
```

```
%初始化个体最优位置和最优值
p=x;
pbest=ones(N,1);
for i=1:N
    pbest(i)=func1(x(i,:));
end
%初始化全局最优位置和最优值
g=ones(1,D);
gbest=inf;
for i=1:N
    if (pbest(i)<gbest)
        g=p(i,:);
        gbest=pbest(i);
    end
end
gb=ones(1,T);
%按照公式依次迭代直到满足精度或者迭代次数
for i=1:T
    for j=1:N
        if (func1(x(j,:))<pbest(j))
            p(j,:)=x(j,:);
            pbest(j)=func1(x(j,:));
        end
        if (pbest(j)<gbest)
            g=p(j,:);
            gbest=pbest(j);
        end
        v(j,:)=w*v(j,:)+c1*rand*(p(j,:)-x(j,:))+c2*rand*(g-x(j,:));
        x(j,:)=x(j,:)+v(j,:);
        %边界条件处理
        for ii=1:D
            if (v(j,ii)<Vmin)||(v(j,ii)>Vmax)
                v(j,ii)=rand*(Vmax-Vmin)+Vmin;
            end
            if (x(j,ii)<Xmin)|(x(j,ii)>Xmax)
                x(j,ii)=rand*(Xmax-Xmin)+Xmin;
            end
        end
    end
    %记录全局最优值
    gb(i)=gbest;
end
g;                      %最优个体
gb(end);                 %最优值
figure
plot(gb)
xlabel('迭代次数')
ylabel('适应度值')
title('适应度进化曲线')
```

```
%适应度函数
function result=func1(x)
summm=sum(x.^2);
result=summ;
end
```