

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

我国内地自 1965 年开始建设第一条地铁至今，城市轨道交通建设已经有 50 年了。最近 10 年来，我国城轨进入了快速建设期，年均新建里程几百公里，到 2013 年末，我国轨道交通运营里程已达 2746 公里。截止到 2014 年末，全国在建和规划建设城市轨道交通的城市有 79 个，其中，北京、上海和广州三个城市网络化效应日益明显，做到了全网统筹规划布局；深圳、南京、重庆、天津等城市的网络化效应正逐步显现；将来，还会有更多城市相继进入网络化时代。我国城市轨道交通真正开始进入一个蓬勃发展时期<sup>[1]</sup>。

与轨道交通单线运营模式不同，网络化运营要求保证线路间互联互通，乘客能够在轨道交通线网内进行无障碍换乘。在网络化运营和无障碍换乘背景下，如何保证城市轨道交通系统正常和高效运营，不仅取决于轨道和车辆等基础设施条件，更有赖于运营管理手段和技术手段的先进性。而运营管理的核心在于客流。断面客流估计可以准确把握客流变化规律，有助于基于客流规律安排运营计划，从而使轨道交通系统的运营管理更加具有科学性和准确性。

断面客流是城市轨道交通运营状态的基本参数，其定义为在统计时段内线路上任一区间断面上通过的乘客数量，在数值上等于在该统计时段内通过该断面的所有列车载客量之和。目前国内对轨道交通断面客流预测的研究内容较多而对断面客流的估计研究较少。断面客流估计数据是断面客流短时预测的基本输入数据，因此，估计方法的合理性关系到预测结果的准确性与可靠性。

根据断面客流的定义可知，进出站的客流能够影响该车站相邻区域的断面客流的变化。除此之外，断面客流还会受到整个线路的客流来源的区域的用地性质、开发程度和大众出行规模的影响，而不仅仅是一个断面所在区间涉及到的区域的影响<sup>[2]</sup>。由于乘客的起始站和目的站不尽相同，所以各个车站的进出站的人数有差异，所以在单向线路中，也会不可避免地出现差异较大的断面客流量分布<sup>[3]</sup>。同时，方向相反的两个线路上，对应的断面客流量也有所不同，一般不会出现所有断面客流数据一致的情况。断面客流量在地铁运营调度中，是分析整个线路客流量分布的依据之一，是不可缺少和替代的数据。

结合研究轨道交通乘客的乘车过程可知，各线路站台上的客流、客流在列车上的分布以及断面客流三者之间相互关联、相互影响，因此，在对轨道交通断面客流进行实时估计时需要完整地、系统地分析三者之间的相互关系<sup>[4]</sup>。现有对断面客流的估计大多是依据轨道交通的年、月、周、日的历史运营数据，来推算同周期内的相似时间段的断面客流，不具有实时性，达不到作为短时预测的基本输入数据的要求，另外，历史断面客流数据在估计时大多将乘客进站刷卡时间作为上车时间，忽略了乘客在站内行走时间对乘客上车的影响，因此估计不够精确。而另有些研究虽考虑了列车和站台客流的交互，但未对站间客流的动态分配规律，以及进站客流和换乘客流到达站台的规律进行深入分析。因此，如何通过研究站间客流 OD 动态分布规律和站间客流分配方法，进而根据列车与站台客流的交互关系，实时估计断面客流，是首先需要解决的难题。

本文所提出的城市轨道交通断面客流估计方法能够针对网络化运营的城市轨道交通线网估算出

行调整。

整理后的 OD 矩阵表如表 2.2 所示。其中，每行数据表示由该车站进站、其他车站出站的人数。

表 2.2 整理后的 OD 矩阵表示例

出站站点 \\	车站 1	车站 2	车站 3	车站 4	车站 5	车站 6	.....	
进站站点 /	车站 1	0	101	68	59	138	32	.....
车站 1	0	101	68	59	138	32	.....	
车站 2	82	0	115	298	696	221	.....	
车站 3	72	170	0	149	566	207	.....	
车站 4	70	384	180	0	256	138	.....	
车站 5	134	582	482	303	0	318	.....	
车站 6	57	258	191	171	333	0	.....	
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0	

## 2.2 聚类分析相关知识

聚类分析法能够通过分析事物的内在特点和规律，根据事物的相似性原则进行分类。聚类是将数据分类到不同的类或者簇这样的一个过程，所以它的原则是，同一类中的个体有较大的相似性，不同类的个体差异性很大。这种方法适用于没有先验知识的分类；也可以处理多个变量决定的分类。

聚类分析涉及到三个分类统计量：样本间距离、相似系数和类间距离<sup>[29]</sup>。

### 2.2.1 样本间距离

由于聚类是要将数据分类到不同的类中，因而聚类首先要解决的问题是：如何确定两类之间的接近程度。而为了确定两类之间的接近程度，首先要确定两个样本间的接近程度。通常，有两种方式测量两个样本间的接近程度：样本间距离和相似系数。

对于样本间距离可以表述为，假如某样本含有  $p$  个变量，那么， $n$  个样本可视为  $p$  维空间中的  $n$  个点，于是，样本间的接近程度可以采用点间距离来度量。常用  $d_{ij}$  表示第  $i$  个样本与第  $j$  个样本间的距离；距离越小表示样本间越接近。常用的两个样本间距离有以下几种：

#### 1) 明氏距离

$$d_{ij}(q) = \left( \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^q \right)^{1/q}, q > 0 \quad (2.2)$$

当  $q$  为 1 时，为绝对值距离；当  $q$  为 2 时，为欧式距离；当  $q$  为  $\infty$  时，为切比雪夫距离。

#### 2) 马式距离

由于样本各变量的观测值往往为随机变量，因此第  $i$  个样本的  $p$  个变量的观测值  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T$  是一个  $p$  维随机向量。考虑到随机向量具有一定的分布律，以及各个分量之间的相关性，因此可以将第  $i$  个与第  $j$  个样本间马氏距离的平方记为：

$$d_{ij}^2(q) = (x_i - \bar{x}_j)^T \Sigma^{-1} (x_i - \bar{x}_j) \quad (2.3)$$

式中， $\Sigma$  是随机变量的协方差矩阵。

### 2.2.2 样本相似系数

除了样本间距离以外，可以用相似系数来度量样本间的相似程度。相似系数有多种定义形式：

#### 1) 夹角余弦

假设一个样本集的样本都是  $p$  维向量，则第  $i$  个与第  $j$  个样本间的相似系数可用两个向量的夹角余弦  $\cos(\theta_{ij})$  表示，记为：

$$q_{ij} = \cos(\theta_{ij}) = \frac{\sum_{k=1}^p (x_{ik} x_{jk})}{\left( \sum_{k=1}^p x_{ik}^2 \sum_{k=1}^p x_{jk}^2 \right)^{1/2}} \quad (2.4)$$

#### 2) 相关系数

两个  $p$  维样本  $i$  和  $j$  的相关系数可记为：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^p (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (2.5)$$

式中， $\bar{x}_i$ ， $\bar{x}_j$  为均值， $\bar{x}_i = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_{ki}$ ， $\bar{x}_j = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_{kj}$ 。

相似系数很容易转变成样本间距离，而样本间距离便于聚类，因此可直接用样本间距离进行聚类。

### 2.2.3 类间距离

当两个样本间的距离确定之后，有很多方法定义类间距离。设有多个类  $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ ，各有  $n_1, n_2, \dots, n_k$  个样本。 $n$  是样本总个数， $p$  是变量个数， $x_i$  是第  $i$  个样本 ( $i$  次观测值)； $C_k$  是第  $k$  类， $n_k$  是  $C_k$  中的样本个数 (观测数)， $d(x, y)$  是样本  $x$ ， $y$  之间的距离， $D_{ij}$  是第  $i$  类与第  $j$  类之间的距离； $\bar{x}_i$  是第  $i$  类样本均值向量， $\bar{x}$  是总样本均值向量。定义方法如下：

#### 1) 类平均法。它将类间距离定义为两类中任意两个元素间距离的平均值，即

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{x_i \in C_i} \sum_{x_j \in C_j} d^2(x_i, x_j) / n_i n_j} \quad (2.6)$$

#### 2) 重心法。它将类间距离定义为两类的重心间的距离。样本 $x$ 与 $C_k$ 类距离为

$D(x, k) = \left\| \bar{x} - \bar{x}_k \right\|_2$ ; i, j 类之间的距离为

$$D_{ij} = \left\| \bar{x}_i - \bar{y}_j \right\|_2 \quad (2.7)$$

3) 最长距离法。它将类间距离定义为两类中最远的两个元素间的距离, 即

$$D_{ij} = \max_{x_t \in C_i} \max_{y_s \in C_j} d(x_t, y_s) \quad (2.8)$$

4) 最短距离法。它将类间距离定义为两类中最近的两个元素间的距离, 即

$$D_{ij} = \min_{x_t \in C_i} \min_{y_s \in C_j} d(x_t, y_s) \quad (2.9)$$

其他还有 ward 离差平方和法、密度法、最大似然估计法、可变类平均法、相似分析法、两阶段密度估计法等。

## 2.3 客流线网 OD 矩阵分布规律

### 2.3.1 研究各特征日合理的统计时段

为了确定各特征日合理的统计时段, 可以先将各特征日全天按照一定的时间间隔划分成若干时间段, 然后研究这些时段客流线网 OD 分布矩阵之间的相似性与差异性, 将相似性较大的时段合并在一起, 由此得出该特征日合理的统计时段, 同时也可得出该统计时段客流线网的分配规律。在计算断面客流估计之时, 只需根据运营日当天所属的特征日和运营时段所属的时间段就可以选取相应的 OD 矩阵, 作为确定该运营日该时段实时客流 OD 分布的输入数据。根据本章 2.2 小节对聚类分析的描述, 可知此类问题适宜用聚类分析法来解决。

#### 2.3.1.1 模型构建

通过对乘客交易记录进行统计和分析可以得到任一时段的线网 OD 信息。方法如下: 选取具有相似特征日期的相同时段, 如每个工作日、双休日和特殊节假日等。假设  $S_k^m$  为具有某特征日的运营日  $k$  中任一时段  $t_m$  的 OD 分布, 且同样具有该种特征的日期在时段  $t_m$  的 OD 分布共有  $N$  个样本, 则

运用简单时间序列平滑法可得  $S^m = \frac{1}{N} \left( \sum_{k=1}^n S_k^m \right)$ 。

由本章 2.1 节客流数据提取与预处理可知, 初步提取的 OD 矩阵表中的每个数据为客流人数。因为轨道交通每个运营日每个车站在各个时段的进站客流量有所不同, 所以为了排除时段进站客流人数对聚类分析的影响, 需要将 OD 矩阵表中的客流人数转换为客流分配概率。

假设轨道交通线网共有  $n$  个车站, 在时间段  $t_m$  内由  $i$  车站进站  $j$  车站出站的乘客数量记为  $S_{ij}^m$ ,  $t_m$

时段内  $i$  车站进站的乘客总数为  $\sum_{j=1}^n S_{ij}^m$ , 当  $i = j$  时,  $S_{ii}^m = 0$ 。因此在时间段  $t_m$  内由全线网进出站客

流构成的一个  $n \times n$  维 OD 分布矩阵为：

$$(S^m) = \begin{Bmatrix} 0 & S_{12}^m / \sum_{j=1}^n S_{1j}^m & \cdots & S_{1j}^m / \sum_{j=1}^n S_{1j}^m & \cdots & S_{1n}^m / \sum_{j=1}^n S_{1j}^m \\ S_{21}^m / \sum_{j=1}^n S_{2j}^m & 0 & \cdots & S_{2j}^m / \sum_{j=1}^n S_{2j}^m & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{i1}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m & S_{i2}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m & \cdots & S_{ij}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m & \cdots & S_{in}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1}^m / \sum_{j=1}^n S_{nj}^m & S_{n2}^m / \sum_{j=1}^n S_{nj}^m & \cdots & S_{nj}^m / \sum_{j=1}^n S_{nj}^m & \cdots & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

式中， $(S^m)$  表示 OD 分布概率表；矩阵中的元素  $S_{ij}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m$  表示由  $i$  车站进站、 $j$  车站出站的客流概率。

考虑线网中的一个车站  $i$  ( $i > 1$ )，时间段  $t_m$  内在该车站进站其他车站出站的客流构成一个  $1 \times n$  维的行向量，即  $X^m = [S_{i1}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m, \dots, S_{ij}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m, S_{i(j+1)}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m, \dots, S_{in}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m]$ ，该行向量中的每一个元素  $S_{ij}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m$  表示由  $i$  车站进站、 $j$  车站出站的客流概率，所以有  $\sum_{j=1}^n \left( S_{ij}^m / \sum_{j=1}^n S_{ij}^m \right) = 1$ 。

### 2.3.1.2 建模过程

本文选取南京地铁 2014 年 7 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日期间工作日的客流数据作为基础数据，研究客流线网在工作日的 OD 矩阵分布规律。

虽然南京轨道交通线网不同线路具有不同的运营时间，但是一般都在 5:30 到 24:00 的区间之内，参考南京轨道列车运行时刻表，本文决定以半小时为间隔将全天运营时段划分为 37 个时段，即 (5:30~6:00), (6:00~6:30), (6:30~7:00), ... (23:30~24:00)。

根据公式(2.10)转换后的 OD 矩阵概率表如表 2.3 所示。

表 2.3 转换后的 OD 矩阵概率表

出站站点 进站站点	车站 1	车站 2	车站 3	车站 4	车站 5	车站 6	.....	合计
车站 1	0	0.07421	0.01262	0.01645	0.04169	0.02104	.....	1
车站 2	0.00635	0	0.00602	0.01309	0.04446	0.01353	.....	1
车站 3	0.00299	0.01039	0	0.00457	0.01597	0.00790	.....	1
车站 4	0.00636	0.03088	0.00588	0	0.01405	0.00696	.....	1
车站 5	0.00601	0.03402	0.00841	0.00561	0	0.01202	.....	1
车站 6	0.00231	0.01172	0.00301	0.00305	0.01	0	.....	1
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0	1

其中，每行数据表示由同一车站进站、其他车站出站的概率，由此可知对于每行数据，各个单元格中的数值之和为1。

然后借助 MATLAB 软件强大的矩阵处理能力，对基础数据进行聚类分析，研究其统计规律。由于 Matlab 中对于单个样本的格式要求是 1 行\*m 列的向量，因此，将每个 OD 矩阵表的  $n*n$  矩阵转化为 $1*n^2$  的向量再作为输入数据。

运用 MATLAB 进行聚类分析的主要流程如下：

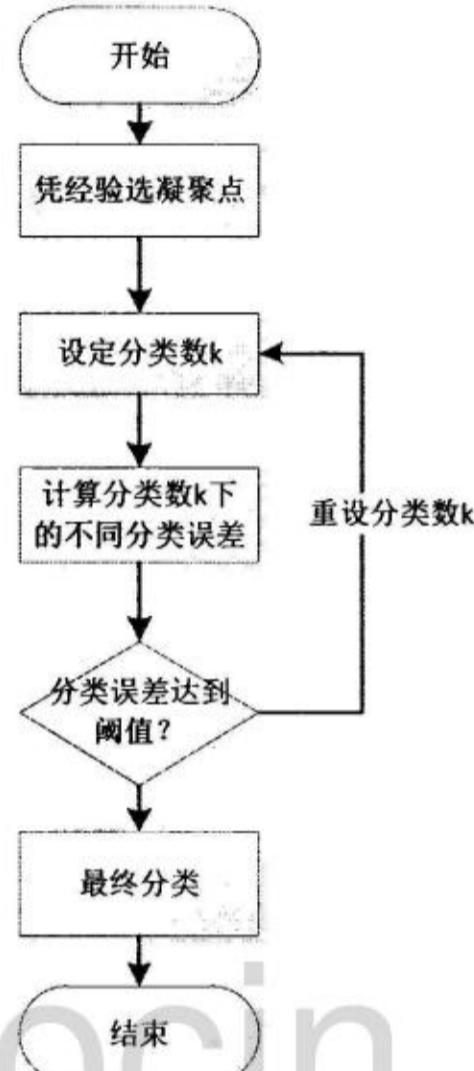


图 2-2 特征日划分算法

### 2.3.1.3 建模结果

参考轨道交通的列车运行时刻表，对于工作日来说，可以划分为早平峰、早高峰、平峰、晚高峰、晚次高峰和晚平峰共 6 个阶段。据此设定聚类的分类数  $k = 6$ ，对客流进行聚类分析，得到以下运算结果：

表 2.4 工作日 OD 区间分类表

分类 (k=6)	误差 ( $10^{-4}$ )
{i1}, {i2}, {i3}, {i4}, {i5}, {i6, i7, i8, i9, i10, i11, i12, i13, i14, i15, i16, i17, i18, i19, i20, i21, i22, i23, i24, i25, i26, i27, i28, i29, i30, i31, i32, i33, i34, i35, i36, i37}	97.16
{i1, i2}, {i3, i4}, {i5, i6}, {i7, i8}, {i9, i10}, {i11, i12, i13, i14, i15, i16, i17, i18, i19, i20, i21, i22, i23, i24, i25, i26, i27, i28, i29, i30, i31, i32, i33, i34, i35, i36, i37}	93.21
.....	.....
{i1, i2, i3}, {i4, i5, i6, i7}, {i8, i9, i10, i11, i12, i13, i14, i15, i16, i17, i18, i19, i20, i21}, {i22, i23, i24, i25, i26, i27}, {i28, i29, i30}, {i31, i32, i33, i34, i35, i36, i37}	48.35
.....	.....

通过计算结果取误差最小的分类，得到分类为 6 时的最优分类为 {i1, i2, i3}, {i4, i5, i6, i7}, {i8, i9, i10, i11, i12, i13, i14, i15, i16, i17, i18, i19, i20, i21}, {i22, i23, i24, i25, i26, i27}, {i28, i29, i30}, {i31, i32, i33, i34, i35, i36, i37}，转化为时段即得到峰值区间为 {5: 30-7: 00}, {7:00-9:00}, {9:00-16:00}, {16:00-19:00}, {19:00-20:30}, {20:30-24:00}。

对于周末和节假日两类特征日 OD 矩阵分布的合理统计时段可以同理得出，在此不一一举例。

### 2.3.2 统计某特征日某合理统计时段内的 OD 分布矩阵表

#### 2.3.2.1 模型构建

在得出各特征日的合理统计时段后，通过对乘客交易记录进行统计和分析可以得到该时段的线网 OD 信息。统计方法与本章 2.3.1 小节类似，可选取具有相似特征日期的相同时段，运用简单时间序列平滑法统计得出，在此不再赘述。

#### 2.3.2.2 建模过程

本文选取南京地铁工作日的 7:00-9:00 的 OD 矩阵表作为研究案例，选取 2014 年 7 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日期间工作日的 7:00-9:00 的客流数据作为基础数据。借助 MATLAB 软件进行模型求解。

#### 2.3.2.3 建模结果

建模结果如表 2.5 所示。

表 2.5 工作日早高峰时段的 OD 矩阵表

出站站点 进站站点 \	车站 1	车站 2	车站 3	车站 4	车站 5	车站 6	.....
车站 1	0	86	70	64	102	26	.....
车站 2	77	0	111	288	445	173	.....
车站 3	94	128	0	210	557	191	.....
车站 4	86	317	237	0	152	129	.....
车站 5	100	421	540	218	0	235	.....
车站 6	63	218	246	165	321	0	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0

依照本小节示例的建模方法，需要对所有特征日的所有统计时段的 OD 矩阵表做出统计，以作为后文中推算线路 OD 分布概率表提供输入数据。

## 2.4 本章小结

本章首先介绍了论文所用基础数据采集类型、方法以及具体数据要求，以及对原始数据的预处理。接着详细介绍了本文涉及到的聚类分析相关知识，包括样本间距离、样本相似系数和类间距离。然后，基于线网实际客流数据，研究了地铁线网 OD 矩阵分布规律，选取了南京地铁工作日的 OD 信息作为案例研究，借助 Matlab 软件运用聚类分析法对这 37 个时段的 OD 信息进行聚类分析，得出工作日分成 6 个统计时段，在每个统计时段内，OD 矩阵分布非常相似。最后，运用简单时间序列平滑法对各统计时段的 OD 矩阵分布进行了统计，选取了南京地铁工作日的早高峰时段作为案例研究，得出了工作日早高峰时段的 OD 矩阵表。

## 第三章 城市轨道交通客流到达站台规律分析

本章从断面客流估计中实时上车人数的计算考虑，第一步就是计算站台上的实时到达人数。如果一个车站为非换乘站，那么，在该车站站台上候车的乘客全数来自于本站刷卡进站的乘客；如果一个车站为换乘站，那么在该车站某条线路上的站台候车的乘客，一部分来自于本站进站将要乘坐该线路的进站客流，另一部分来自其他线路换乘至本条线路的换乘客流。

结合轨道交通乘客的进站乘车过程，可知进站客流到达站台人数的计算可以由实时刷卡进站人数和乘客在某时间段内到达站台的概率相结合得出。其中，实时刷卡进站人数可以通过 AFC 系统直接计算得出；而乘客在某时间段内到达站台的概率与乘客在站厅内选择的路径与在该路径上的行走时间分布规律有关，因此需要研究乘客在站内的路径选择规律和在该路径上的行走时间分布规律。同样地，换乘客流到达站台人数的计算，可以由换乘客流实时到达人数和换乘乘客在某时间段内到达站台的概率相结合得出。其中，换乘客流实时到达人数无法通过 AFC 系统获得，因此需要研究换成客流的到达规律。

因此，本章首先研究乘客站内行走规律，包括乘客站内的路径选择规律和在该路径上的行走时间分布规律。然后研究换乘客流到达的规律。最终在此基础上得出乘客到达站台的规律。

### 3.1 乘客站内行走规律

乘客站内行走规律包括客流在整个轨道交通站内设施如站厅、站台、楼梯、闸机等上的路径选择、客流交织、客流走行速度、客流到达等规律。本节在分析乘客站内行走规律的影响因素的基础上，对乘客站内路径选择规律做出了研究，最后对乘客站内行走时间分布规律进行了分析。

#### 3.1.1 乘客站内行走规律的影响因素分析

行人交通微观特性以及所处车站具体环境影响轨道交通站内客流的密度、速度、流量以及流线，从而对其行走时间产生影响。

##### 3.1.1.1 行人微观特性分析

- 步幅

步幅是行人在行走时一步所迈出的距离，为先后着地的两脚跟或两脚尖的距离，个体在行走过程中步幅相对稳定，通常用米表示<sup>[30]</sup>。步幅的大小由年龄、性别、生理特性和心理状况等因素的决定。通常身体高、下坡、赶时间的情况下步幅大，而身矮、上坡、休闲时则步幅小；男性、中青年步幅要大于妇女、老年人和儿童同时在拥挤的环境下，行人的步幅受到影响。

- 步频

步频是行人步行时两脚着地的频率，即每分钟着地的次数，单位为步/秒或步/分。车站行人步频通常受到出行目的、车站交通环境、设施布局、行李数量、客流前进速度等因素影响。

- 步速

步行速度指行人在单位时间内行进的距离，它取决于步频和步幅，等于步幅与步频的乘积，本

文步速由乘客通过特定长度距离除以通过该距离所耗费时间求得，单位是米/秒或米/分。

- 行人空间

在行人流中，行人体积占有一定的空间同时为避免与其他人发生或障碍物发生接触需要一定的动态空间，动态空间的大小与行走速度、个人习惯、周围环境、心理状况、前方视距有关，通常是波动变化的。行人空间从一个侧面反映了客流的密度，也是衡量设施交通服务水平的重要指标，数值上等于密度的倒数，单位为平方米/人。

### 3.1.1.2 车站设施布局分析

城市轨道交通车站的建筑结构与设施布局影响客流在车站内的行走流线与聚集位置，导致客流速度、密度以及流量的变化，从而影响客流在车站内的行走规律。城市轨道交通车站内设施按其功能划分，可分为车站乘客空间设施、乘客信息诱导设施以及交通工具设施<sup>[31]</sup>。以上车站设施在车站内有机组合、相互协调，共同组织完成乘车从进站-购票-检票-候车-乘车这一过程，合理的设施布局能使车站乘客系统有序运转，提供乘客高效、舒适、省时的进站候车过程。车站设施组成图如图 3-1 所示：

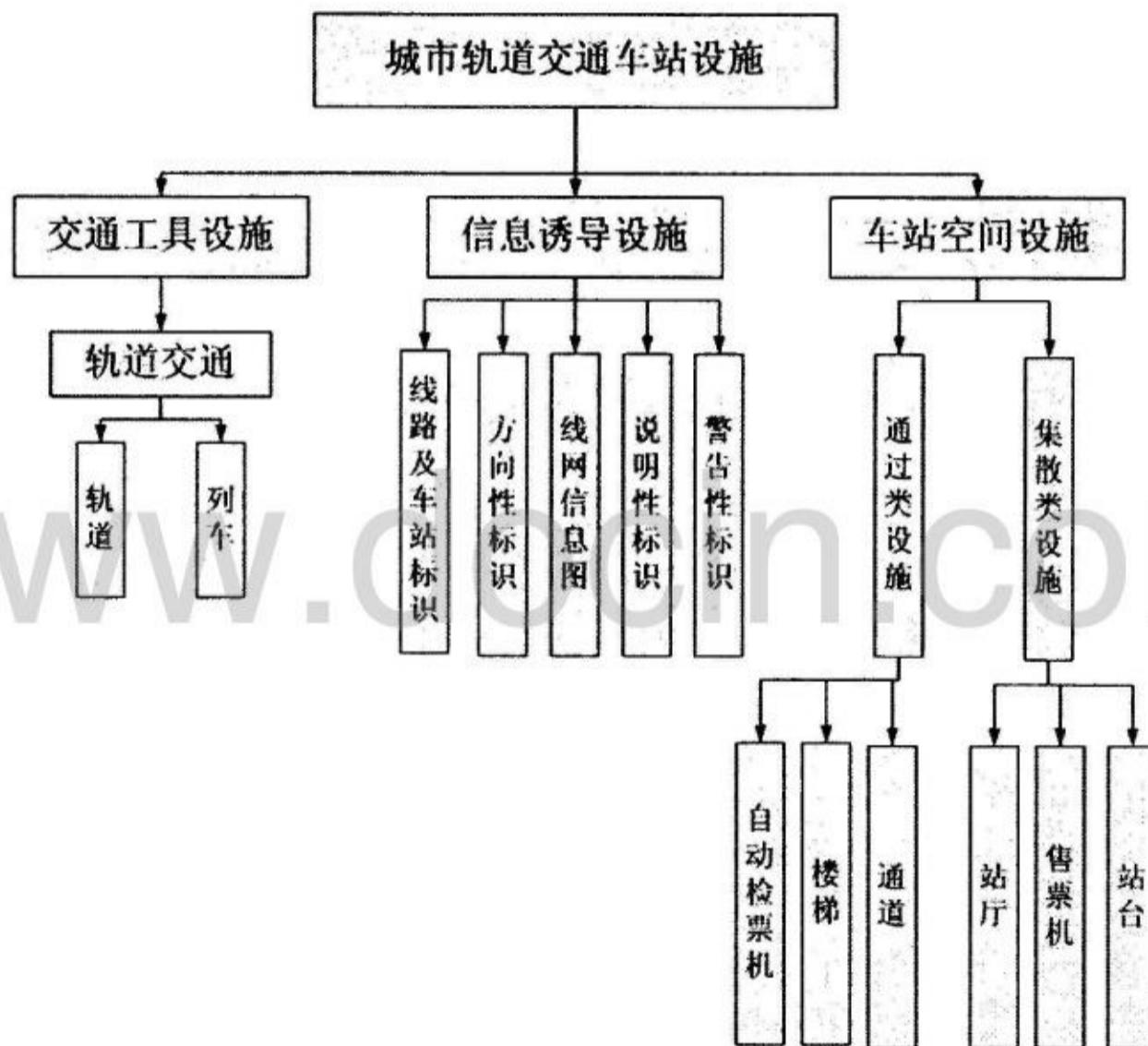


图 3-1 车站设施组成图

- 通道

通道分为出入口通道和换乘通道。出入口通道通常布置在城市道路的两侧、人流量大的广场、交叉口，是地铁系统与城市的纽带。根据《地铁设计规范》<sup>[32]</sup>，出入口的数量、宽度设计应根据车站远期高峰小时双向客流中较大的客流设计。换乘通道是直接连通不同线路的两个车站的非延滞性步行设施。换乘通道一般设计为单向通行，因此没有对向客流的干扰，乘客行为特征单一，走行速

度较快。通道的坡度、长短与宽度直接影响客流的速度与密度，较长或较宽的通道客流密度一般较低，乘客互相干扰小；当通道较短或较窄时，乘客相互影响严重，客流密度高行进速度慢，造成通道拥挤，通行能力下降，该现象在通道的突变处尤为明显<sup>[33]</sup>。

#### ● 楼梯和自动扶梯

楼梯和自动扶梯用于连通存在高差的轨道交通空间，如连接站厅与地面、站厅与站台。通常在高峰小时，楼梯和自动扶梯是客流大量拥堵的设施。由于乘客到达车站通常不具有聚集性，因此在从地面进入站厅的楼梯和自动扶梯客流通常不发生拥堵现象，当乘客由站厅进入站台时，先要受到自动检票机通过能力的限制，通常楼梯和自动扶梯的通行能力要高于自动检票机，在连接站厅与站台的楼梯和自动扶梯在进站方向上一般不会发生拥堵排队现象；当乘客出站时，由于列车到站带来的瞬时聚集性客流，容易导致自动检票机和连接站台和站厅的楼梯口出现拥堵排队现象。相比于楼梯，乘客在大多数情况下更热衷于选择自动扶梯，因此自动扶梯更易出现拥堵现象。

#### ● 闸机

闸机分割了轨道交通车站的收费区域与免费区域，设置闸机的目的是为了保证客流能够有序、顺利的进入或走出车站并完成计费行为。闸机的布局主要分为两种：垂直于客流行走方向和平行于客流行走方向<sup>[34]</sup>。图 3-2 和 3-3 分别描述了两种状况：

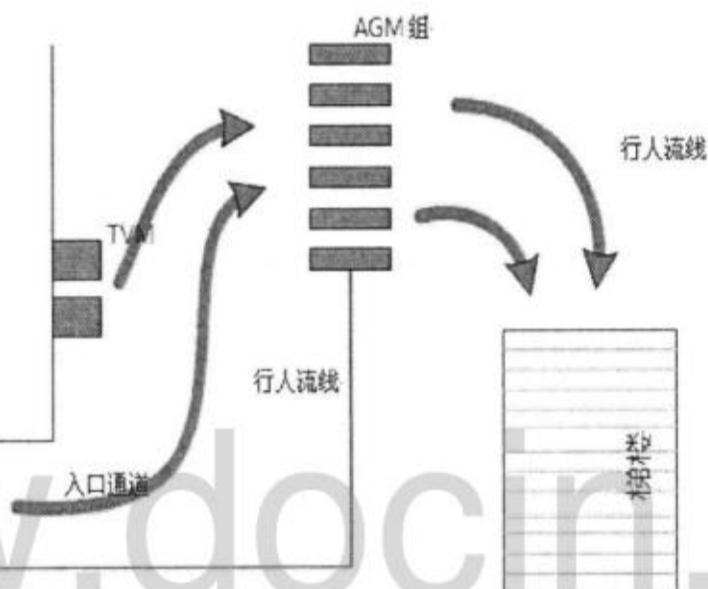


图 3-2 闸机垂直于客流方向布置

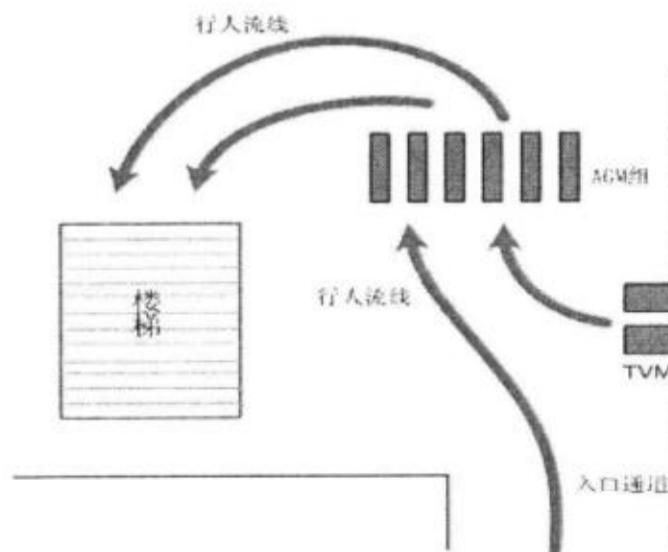


图 3-3 闸机平行于客流方向布置

当闸机垂直于客流方向布置时，由于乘客在进站时倾向于选择离自己较近的闸机，因此导致闸

各个断面的实时客流量。根据计算出的实时断面客流，运营管理部门可以对运营计划实时调整、对拥堵客流进行疏导、提高轨道交通服务水平等，并能够为断面客流预测提供输入数据，因而具有重要的研究意义。

## 1.2 国内外研究现状

本文所采用的断面客流估计的基本原理是从站间 OD 矩阵出发，通过实时计算各站台的上车人数和下车人数，推算列车的实时载客量，进而得出一定统计时段内各区间断面的断面客流。下面针对本文在客流 OD 矩阵分配和断面客流估计方面涉及的相关理论研究做出如下总结。

### 1) 客流 OD 矩阵分配模型

城市轨道交通网络客流分配属于交通分配问题研究的范畴，其通过将已有的 OD 出行量按照一定原则分配至路网上从而得到各路段的交通量。对于此类问题，国内主要借鉴城市道路交通网络分配理论，一般采用“最短路径”算法或“多路径概率分配”算法。

“最短路径”算法采用“全由全无”的分类理念，将客流量按照分配比例 100%（全有）分配到最短路径上，而其他路径上，客流量的分配比例为零（全无）。例如，牛新奇<sup>[5]</sup>假设全部乘客都选择最短路径出行，将全部网络流量分配到最短路径上。王丽娜<sup>[6]</sup>基于历史客流数据，利用最短路径分配法将 OD 客流量分配到路网上，从而得到断面客流，认为使用最短路径法对北京市地铁网络的断面客流进行计算是符合实际的。刘倩<sup>[7]</sup>通过分析大量进出站以及断面客流历史数据，获取各个时间段的 OD 客流量，使用最短路径分配法，以 5 分钟为时间间隔将北京城轨系统的 OD 客流分配到最优时间路径上，从而得到符合实际的断面客流。“最短路径”算法没有考虑城市轨道交通网络中复杂多变的实际情况，对影响乘客出行路径选择的其他因素考虑不够充分。

“多路径概率分配”算法是通过考虑乘客路径选择的一系列影响因素和搜索网络中得有效路径来建立分配模型，得出乘客选择各条有效路径的概率。它们大多采用 Logit 模型作为建模方法。例如，徐瑞华<sup>[8]</sup>通过分析乘客出行路径选择的特性及其影响因素，提出一种多路径概率分布模型，设计了基于深度优先的路径搜索算法以确定有效路径及各条有效路径上的客流概率分配，并以北京地铁实际客流数据验证了模型和算法的有效性。宋红颖<sup>[9]</sup>通过考虑多种影响因素建立 Logit 分配模型，将各 OD 点之间的客流根据 Logit 模型计算的比例分配到有效路径上，得到路段的断面客流。Liu 等<sup>[10]</sup>根据进出站 IC 卡数据采用 Logit 模型得出整个轨道交通路网的站间矩阵后，提出了客流路径分配算法。Si 等<sup>[11]</sup>利用自动售检票（AFC）系统的数据，在考虑换乘情况总行程时间、换乘花费两个主要因素后，提出一种改进的 Logit 模型，得出所有 OD 矩阵中的换乘“有效路径”，从而估计换乘客流。目前，国内大部分的城市轨道交通客流分配都采用多路径概率分配方法，但是由于“多路径概率分配”算法在确定路径比例时，需要大量人工调查对 Logit 模型的参数进行标定，调查费用高且数据可靠度难以保证。

因此，近年来开始有学者运用 AFC 系统中记录的真实乘客出行信息或智能卡数据来研究乘客路径选择行为。Chan<sup>[12]</sup>利用伦敦地铁卡数据对客流 OD 矩阵估计进行了研究，并根据乘客在 OD、线路和车站层面上的旅行时间变化对轨道交通服务可靠性度量进行了研究。Zhou 等<sup>[13]</sup>通过采用 AFC 乘客进出站时间数据和列车运行时刻表，缩小乘客的路径选择范围，并设计算法求得乘客选择每条

机组各闸机的利用率不均；当闸机平行于客流方向布置时，乘客到各闸机的距离大致相同，乘客对闸机的选择概率也大致相同<sup>[35]</sup>。文献<sup>[36]</sup>和文献<sup>[37]</sup>分别从计算和仿真的角度证明了闸机平行于客流方向布置时乘客行走时间上的损失要优于闸机垂直于客流方向布置的情况。同时，客流方向与闸机布置方向夹角越小，则乘客之间相互影响越小，客流的通行效率越高。

### ● 站台

站台为轨道交通乘客提供了上下车以及候车的场所，客流在此区域流动复杂、高度密集且随列车运营时间呈现出一定规律。站台通常分为集散区和乘降区两部分，用于疏散与容纳不同客流。站台上客流密度与所处时段、车站类型、站台形式、站台面积、邻接通道扶梯有关并随着列车的停靠时间呈现出周期性变化。

### ● 站厅

站厅是轨道交通车站的主体，布置有 AFC 车站设备与乘客信息诱导设施并通过通道或楼梯与站台、地上空间相连，是保证乘客完成各自交通目的的一个过渡空间。站厅中的 AFC 设备、楼梯和自动扶梯口可以看成乘客在站厅内活动的 OD 点，按照乘客进站-购票-检票-候车这一过程在站厅内构成了不同的流线。图 3-4 为南京奥体中心站厅设备布置平面图：

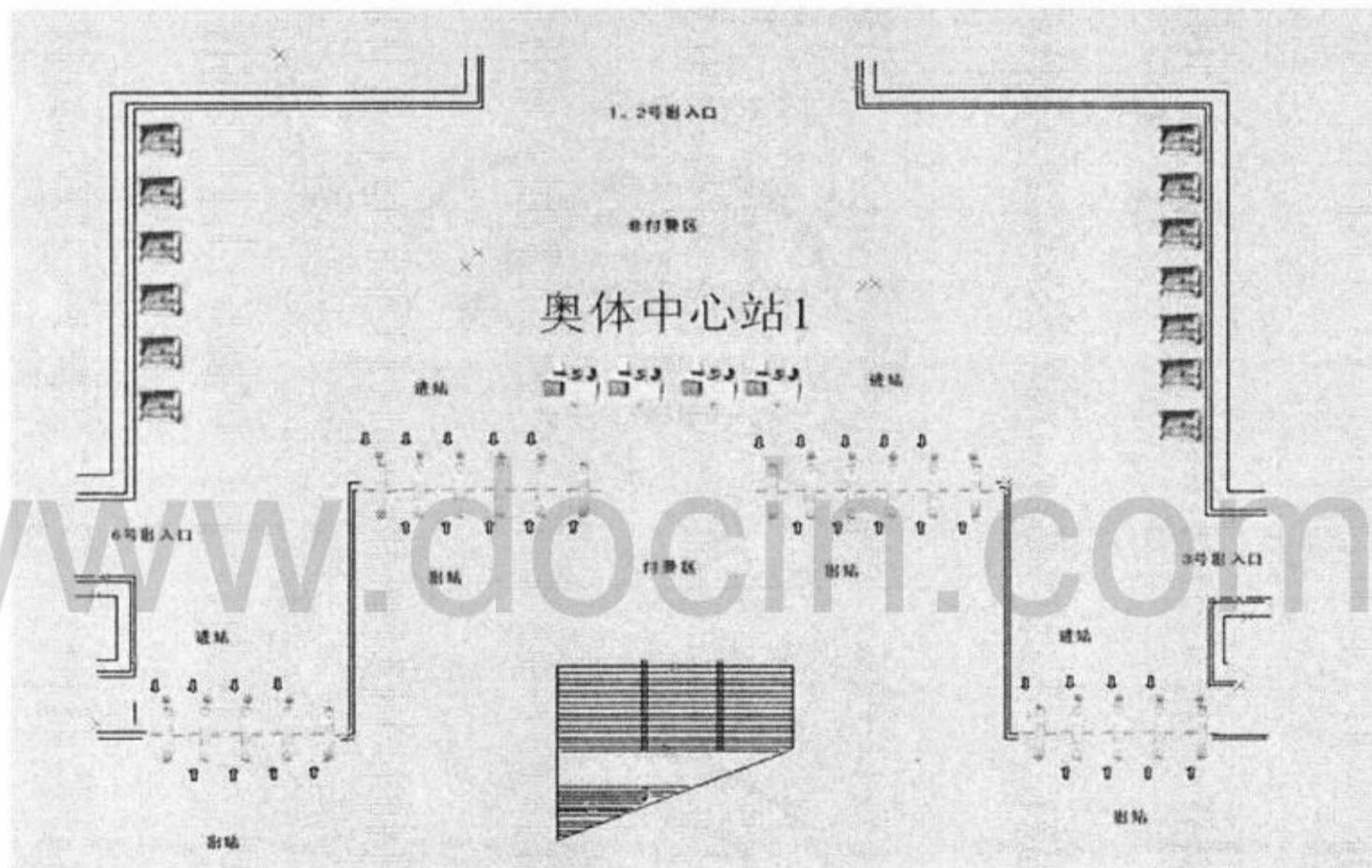


图 3-4 南京奥体中心站厅设备布置平面图

### 3.1.2 客流站厅路径选择分析

轨道交通乘客从楼梯到达站厅后，在站厅选择不同的路径到达站台。路径选择是指乘客在各种因素的综合影响下，从起点经过一系列中间节点到达目的地的过程，是乘客理性决策与习惯行为相互作用的结果<sup>[38]</sup>。在轨道交通车站中，轨道交通乘客以进站楼梯口为起点，经过闸机、售票机等中间节点，最后抵达站台楼梯，完成站厅的路径选择，乘客站厅路径选择流程机理如图 3-5 所示。通过对乘客在站内路径选择规律的研究，可以求出乘客选择站内每条路径的概率。

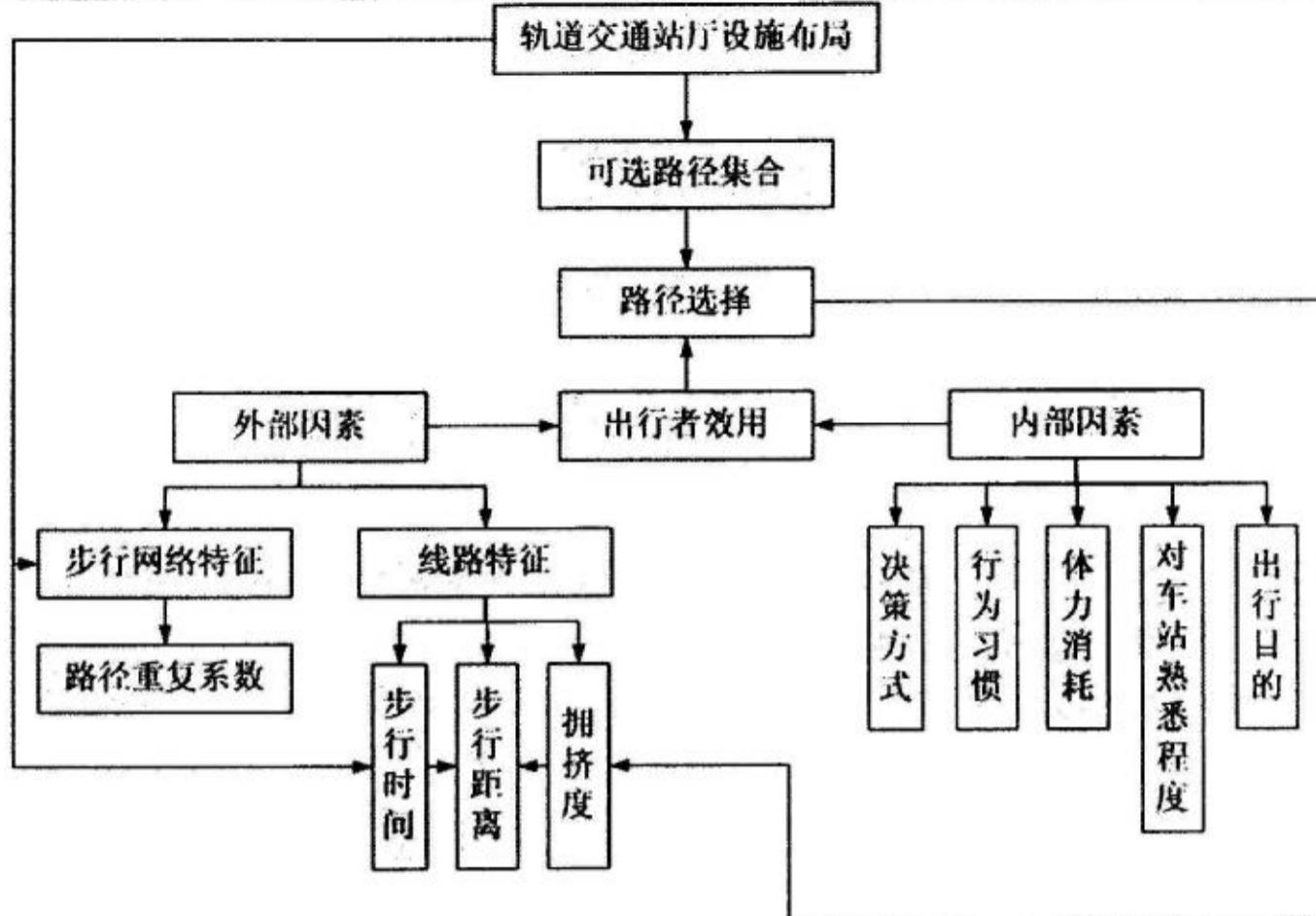


图 3-5 乘客站厅路径选择流程机理图

### 3.1.2.1 多项 Logit 模型

决策者的选择行为受到许多内部因素、外部条件的影响，具有多样性与复杂性。然而在选择行为的背后，隐藏着决策者的一些共同特征与规律。

离散选择模型是近年来广泛用于交通、医疗、销售等领域，用于描述决策者在选择集合内对选项的筛选行为。模型通过对不同选项所具备属性以及决策者偏好的分析，定量描述决策者与选择集合之间的关系。轨道交通站厅乘客作为决策者，根据自身情况以及个人偏好选择由站厅到站台的通行路径，不同路径在时间、距离、拥挤度等方面各不相同，乘客通过估计与预测选择对自身效用最大的路径。在效用理论中，总效用分为固定效用与随机效用两部分，其表达式为：

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (3.1)$$

固定效用  $V_{nj}$  为效用的可观测部分，通常包含决策者的属性变量和选项的属性变量。例如在轨道交通站厅乘客中，不同类型乘客的社会学人口特征、出行目的等，不同选择路径所花费的时间、距离、舒适感等， $V_{nj}$  一般假定为线性函数。 $\varepsilon_{nj}$  为不可观测部分的随机效用，为难以观测因素及误差产生的影响。

多项 Logit (Multinomial Logit) 模型是运用最为广泛的离散选择模型之一，模型假设式 X 中  $V_{nj}$  和  $\varepsilon_{nj}$  相互独立且  $g(\varepsilon)$  服从 Gumel 分布，各  $\varepsilon_{nj}$  的密度函数的分布函数如公式(3.2)：

$$F(\varepsilon_j) = \exp(-e^{-\lambda(\varepsilon_j - \eta)}) \quad (3.2)$$

式中， $\lambda$  为  $\varepsilon_{nj}$  的方差  $\delta^2$  相对应的参数， $\lambda^2 = \pi^2 / 6 \delta^2$ ， $\varepsilon_{nj}$  的期望值为  $\eta + \gamma / \lambda$ ， $\gamma = 0.577$ ， $\eta$

为表示  $\varepsilon_{nj}$  的常见值参数，通常取  $\eta=0$ 。

由此推导得到出行者 n 选择路径 i 的多项 logit 模型的选择概率公式为：

$$P_{n(i)} = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in R} \exp(V_{jn})} \quad (3.3)$$

式中：R——可选路径的集合； $V_{jn}$ ——出行者 n 选择可选路径集中第 j 条路径的效用。

### 3.1.2.2 模型构建

本文选择工作日高峰时段轨道交通站厅客流作为研究对象，原因如下：

- 1) 高峰时段站厅客流密集，流线复杂，各种设施得到充分的利用，乘客在个体喜好与外界因素的综合作用下选择对自身效益最大的路径，另外高峰时段保证了路径样本的多样性与合理性。
- 2) 高峰时段客流主要以通勤客流为主，通勤客流特点是出行目的单一、对车站各类环境熟悉（如各设施布局，最短路径，拥挤冲突路径及位置）、路径选择常规性。这些特点在一定程度上保证了乘客选择路径是基于外界客观信息，是理性的，考虑如时间、步行距离、拥挤状态等共同因素，因此省略了对决策对象类型的划分，简化了模型。

基于国外学者对乘客路径选择影响机理的研究成果以及站厅实际观测结果，选择路径长度、步行时间、自动扶梯时间、垂直连接设施类型、路径重复系数、路径固有效用为主要影响因素，个人效用函数定义如下：

$$U_{nj} = \alpha * \log(D_j) + \beta * T_j^1 + \gamma * T_j^2 + \phi * Q_j + \omega * S_j + \mu_j + \varepsilon_j \quad (3.4)$$

式中：

$\alpha, \beta, \gamma, \phi, \omega, \mu$ ——带标定的参数；

$D_j$ ——为路径  $j$  的长度，对其取  $\log$  以平衡量纲；

$T_j^1$ ——路径  $j$  步行时间，乘客在路径上步行花费总时间，单位为秒；

$T_j^2$ ——路径  $j$  自动扶梯/楼梯时间，乘客在自动扶梯/楼梯上花费时间，单位为秒；

$Q_j$ ——垂直连接设施类型，当路径内  $j$  包含自动扶梯时取 1，否则为 0；

$\mu_j$ ——路径  $j$  固有效用；

$S_j$ ——路径重复系数。

在公式中，为表示站厅拥挤度的乘客选择路径的影响，引入  $S_j$  路径重复系数，路径重复系数反映了某条路径与路径集中其他路径的重合情况，其定义为：

$$S_j = \ln\left(\sum_{j \in R} \frac{I_p}{L_j} \cdot \frac{1}{N_p}\right) \quad (3.5)$$

式中:  $I_p$  ——路径  $j$  中子链路  $p$  的长度/m;  $L_j$  ——路径  $j$  的长度/m;  $N_p$  ——子路径中包含  $p$  的路径的个数。

通常不同路径通向不同出入口, 而不同出入口由于其地面设施、土地利用情况的区别成为乘客选择路径的重要因素, 因此本文引入路径固有效用  $\mu_j$  来反映这一因素。乘客路径集  $R$  中, 每条路径都有其独特的  $\mu_j$ , 因此共有  $R$  个这样的参数。由于模型估计的需要, 本文将径集  $R$  中的一条路径的固有效用设定为 0, 其他路径的固有效用值通过对照该路径得到, 因此需估计  $R-1$  个固有效用参数。

### 1) 信息采集与分析

根据上文对个人效用函数的定义, 所需采集的信息分为车站静态信息与乘客动态信息两部分。

#### ● 车站静态信息

本文选取南京地铁一号线珠江路车站作为研究对象, 珠江路车站为双层地下车站, 其中一层为站厅层, 包含付费区与非付费区; 二层为站台层(岛式站台)。其平面布局如图 3-6 所示。

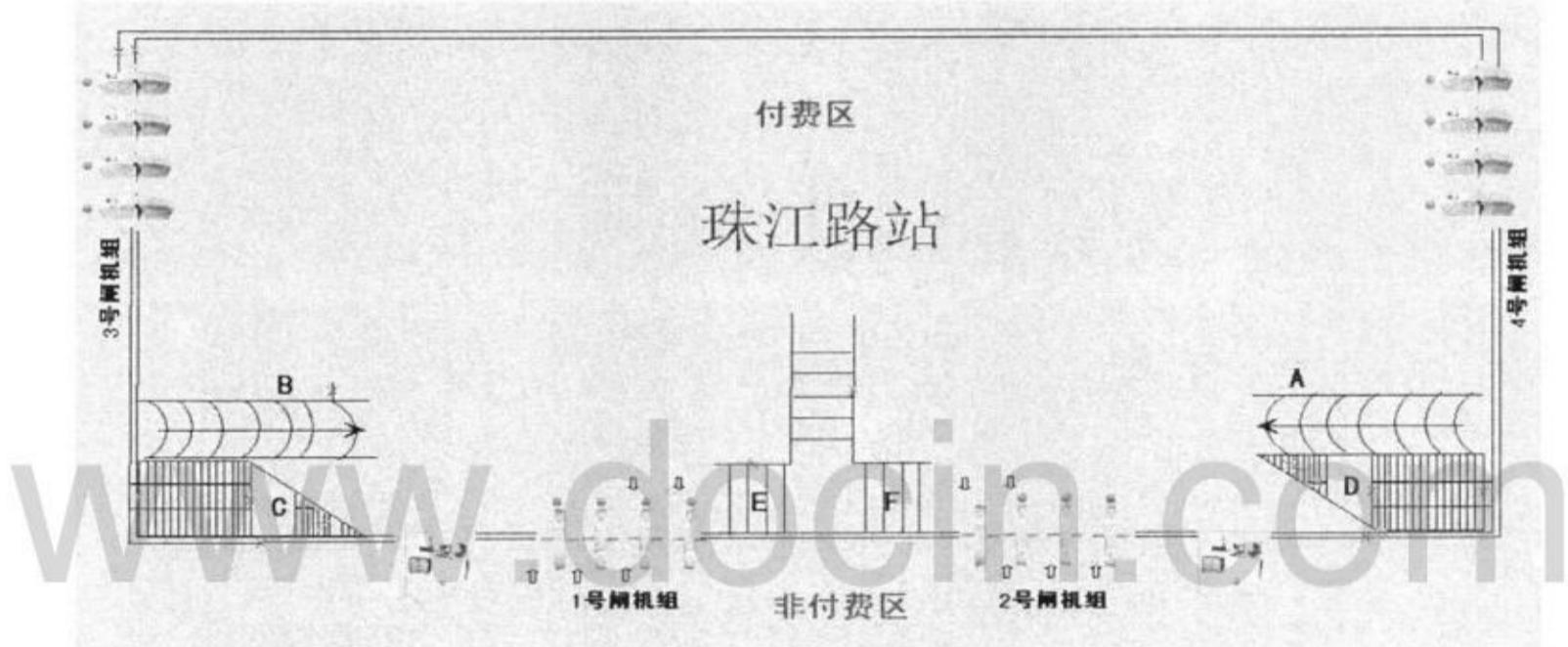


图 3-6 珠江路地铁站平面布局图

站厅层共有 4 对闸机组, 均为双向闸机。A、B 分别为单向自动扶梯, C、D、E、F 为楼梯。本节研究站厅层付费区内的乘客由进站闸机到达站台的路径选择规律, 因此以闸机和楼梯/自动扶梯作为客流的起讫点, 由于珠江路车站布局相对简单且起讫点数量较少, 本文采用穷举法得到 28 条可行路径, 而实际观测样本中所包含的路径通常要小于该值。

可行路径由节点划分的链路构成, 节点的划分为计算路径重复系数提供依据。在轨道交通车站中通常以闸机和通道口为起讫点, 以设施衔接点、车站设备(如自动售票机、自动查询机等)、流线冲突点构成中间节点, 划分链路。由于研究付费区内的行人路径, 本文选择设施衔接点与流线冲突点为中间节点, 有节点与路径构成的车站行人流线拓扑图如图 3-7 所示。

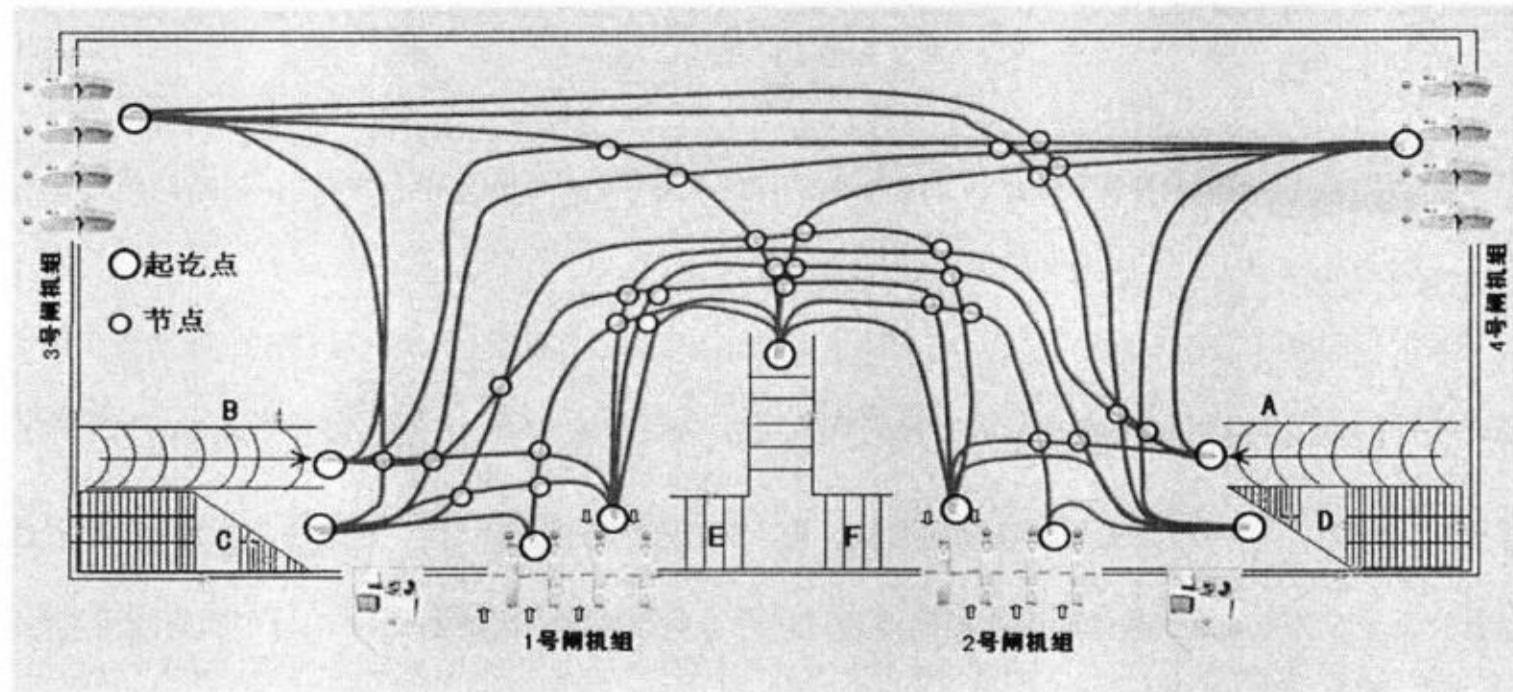


图 3-7 珠江路地铁站平行人流线拓扑图

综上所述，所需的车站静态信息为可行路径长度、可行路径中各子链路的长度、垂直设施类型、垂直设施长度、路径重复系数及自动扶梯的速度，根据珠江路车站现场实测得到的相关统计信息如表 3.1 所示。

表 3.1 珠江路地铁站路径设施实测表

OD 路径	路径长度	设施长度	链路数	路径重复系数	垂直设施类型
A-1	35	10	5	-0.56	自动扶梯
A-2	18.5	10	3	-0.54	自动扶梯
A-3	44.7	10	3	-0.48	自动扶梯
A-4	22.2	10	1	-0.31	自动扶梯
B-1	18.3	10	4	-0.51	自动扶梯
B-2	34.4	10	6	-0.53	自动扶梯
B-3	25.3	10	2	-0.32	自动扶梯
B-4	44.7	10	4	-0.45	自动扶梯
C-1	18.2	10	2	-0.47	楼梯
C-2	39.2	10	6	-0.58	楼梯
C-3	27.2	10	2	-0.35	楼梯
C-4	45.9	10	4	-0.48	楼梯
D-1	36.9	10	5	-0.46	楼梯
D-2	19.6	10	2	-0.43	楼梯
D-3	48.5	10	3	-0.48	楼梯
D-4	27.5	10	3	-0.35	楼梯
E(F)-1	20	12	1	-0.3	楼梯
E(F)-2	20	12	1	-0.3	楼梯
E(F)-3	31.7	12	4	-0.5	楼梯
E(F)-4	31.7	12	4	-0.5	楼梯
1-C	16	10	2	-0.2	楼梯
1-E(F)	23	12	4	-0.42	楼梯
2-D	16	10	2	-0.2	楼梯
2-E(F)	23	12	4	-0.42	楼梯

注：路径长度：米；设施长度：米。

#### ● 乘客动态信息

乘客动态信息包括乘客在可行路径集中选择的路径、乘客在路径中通过垂直设施的总时间。垂直设施包括楼梯和自动扶梯，而通过垂直设施的总时间为进入设施排队时间和通过设施时间之和。通过对 2014 年 11 月珠江路车站周三早高峰时段 7:00-9:00 进行的四次拍摄调查，一共收集到 1069 条有效乘客路径动态信息，其中包含 24 条行人路径，具体乘客相关动态信息如表 3.2 所示：

表 3.2 珠江路地铁站行人动态信息实测表

OD 路径	样本量	平均路径步行时间	平均设施步行时间
A-1	5	45.1	24.9
A-2	61	32.2	25.8
A-3	42	47.6	25.3
A-4	102	31.2	25.5
B-1	32	32.4	24.7
B-2	3	43.7	25.1
B-3	184	33.2	26.2
B-4	20	48.6	25.6
C-1	28	23.4	17.8
C-2	4	38.7	17.3
C-3	124	28.4	16.9
C-4	16	42.3	17.2
D-1	4	36.5	17.3
D-2	34	23.1	17.1
D-3	38	42.9	17.5
D-4	95	27.4	17
E(F)-1	42	23.7	18.7
E(F)-2	39	24	18
E(F)-3	83	33.6	18.4
E(F)-4	35	34.1	18.6
1-C	24	18.3	14
1-E(F)	17	22.8	14.8
2-D	21	18.1	14.4
2-E(F)	16	22.7	14.5

注：平均路径时间：秒；平均设施步行时间：秒。

由于影响因素除了“垂直设施类型”外都为多分类变量，因此为保证自变量与因变量的线性关系，需将路径长度  $D$ 、路径步行时间  $T^1$ 、设施步行时间  $T^2$ 、以及路径重复系数  $S$  转化为哑变量，具体转换规则如表 3.3 所示：

表 3.3 行人路径选择影响因素哑变量转换表

路径长度 $D$		路径步行时间 $T^1$		设施步行时间 $T^2$		路径重复系数 $S$	
$D$ 值	哑变量值	$T^1$ 值	哑变量值	$T^2$ 值	哑变量值	$S$ 值	哑变量值
<20	0	<25	0	<20	0	-0.2~ -0.3	0
20~30	1	25~35	1			-0.3~ -0.4	1
30~40	2	>35	2	>20	1	-0.4~ -0.5	2
>40	3					<-0.5	3

经过哑变量转换后，SAS 多项 logit 回归的输入数据如下表 3.4 所示：

表 3.4 SAS 多项 logit 回归的输入数据表

OD 路径	路径代号	路径长度	路径步行时间	设施步行时间	路径重 复系数	垂直设施 类型	样本量
A-1	1	2	2	1	3	1	5
A-2	2	0	1	1	3	1	61
A-3	3	3	2	1	2	1	42
A-4	4	1	1	1	1	1	102
B-1	5	0	1	1	3	1	32
B-2	6	2	2	1	3	1	3
B-3	7	1	1	1	1	1	184
B-4	8	3	2	1	2	1	20
C-1	9	0	0	0	2	0	28
C-2	10	2	2	0	3	0	4
C-3	11	1	1	0	1	0	124
C-4	12	3	2	0	2	0	16
D-1	13	2	2	0	2	0	4
D-2	14	0	0	0	2	0	34
D-3	15	3	2	0	2	0	38
D-4	16	1	1	0	1	0	95
E(F)-1	17	0	0	0	1	0	42
E(F)-2	18	0	0	0	1	0	39
E(F)-3	19	2	1	0	3	0	83
E(F)-4	20	2	1	0	3	0	35
1-C	21	0	0	0	0	0	24
1-E(F)	22	1	0	0	2	0	17
2-D	23	0	0	0	0	0	21
2-E(F)	24	1	0	0	2	0	16

## 2) 模型标定

标定的结果分两部分，一部分为路径固有效用标定值，另一部分为参数标定结果，如图 3-8 所示：

Parameter Estimates						
Parameter	DF	Estimate	Standard Error	t Value	Approx Pr >  t	Parameter Label
con1_1	1	-2.5014	0.4652	-5.38	<.0001	
con1_3	1	-0.3732	0.2005	-1.86	0.0627	
con1_4	1	0.5141	0.1619	3.18	0.0015	
con1_5	1	-0.6151	0.2183	-2.96	0.0031	
con1_6	1	-3.0121	0.5913	-5.09	<.0001	
con1_7	1	1.1041	0.1477	7.47	<.0001	
con1_8	1	-1.1150	0.2577	-4.33	<.0001	
con1_9	1	-0.7786	0.2283	-3.41	0.0006	
con1_10	1	-2.7244	0.5161	-5.28	<.0001	
con1_11	1	0.7094	0.1564	4.54	<.0001	
con1_12	1	-1.3382	0.2809	-4.76	<.0001	
con1_13	1	-2.7244	0.5161	-5.28	<.0001	
con1_14	1	-0.5816	0.2140	-2.73	0.0063	
con1_15	1	-0.4733	0.2067	-2.29	0.0220	
con1_16	1	0.4130	0.1641	2.70	0.0069	
con1_17	1	-0.3732	0.2005	-1.86	0.0627	
con1_18	1	-0.4173	0.2050	-2.18	0.0291	
con1_19	1	0.3080	0.1686	1.83	0.0678	
con1_20	1	-0.5556	0.2121	-2.62	0.0088	
con1_21	1	-0.9329	0.2410	-3.87	0.0001	
con1_22	1	-1.2778	0.2743	-4.66	<.0001	
con1_23	1	-1.0663	0.2530	-4.21	<.0001	
con1_24	1	-1.3382	0.2809	-4.76	<.0001	
l	0	-0.000689	.	.	.	
t1	0	0.004536	.	.	.	
q	0	0.001474	.	.	.	
t2	0	0	.	.	.	
s	0	0.003552	.	.	.	
Restrict1	1	-1.01E-13	.	.	*	Equal BC t2

图 3-8 MNL 参数标定结果

本文以路径 2 为参考路径，其路径固定效用为 0。从标定结果可以看出，标定的绝大多数路径固定效用通过了  $t$  检验，24 条路径的平均效用值为 -0.8。其中路径 4、路径 7、路径 11、路径 16 以及路径 19 有较高的固定效用，其原因是：①路径 4 与路径 7 的垂直通行设施为自动扶梯且起点距离 3 号、4 号进站闸机最近，而 3 号、4 号闸机出口对应的珠江路站 3 号、4 号出入口地面有交叉口、生活住宅区、公交车站的设施，具有较大的吸引力；②路径 11 与路径 16 重点为距离 3 号、4 号进站闸机最近楼梯出口，由于 3 号、4 号出入口较大的吸引力部分乘客在站台层完成了路径规划（而不是依赖“楼梯/自动扶梯”就近原则），因此具有较高的固定效用；③路径 19 的起点为 3 号出入口，3 号出入口为珠江路车站工作日高峰时段最为拥挤的出入口，因此固有效用较高。而路径 1、路径 6、路径 10 和路径 13 的固有效用低是因为路径 2、路径 5、路径 9、路径 12 能够完全代替以上路线且所花费时间、距离更短，通常只有极个别乘客选择该绕行路径，且路径 1、路径 6、路径 10 和路径 13 对应的起点通向的 1 号、2 号出入口地面设施吸引力不及 3 号、4 号出入口。从参数标定的结果中可知，乘客对路径长度  $D_j$  较为敏感而对路径上步行花费总时间并不敏感；乘客对自动扶梯有较大偏好；路径重复系数对乘客路径选择影响较大，但呈现出正效用，与假设有所区别，考虑可能是路径固有效用因素对乘客选择拥挤路径产生了影响。

### 3.1.2.3 性能评价

以 2014 年 11 月珠江路周三早高峰时段 8:00-8:30 进行拍摄调查收集到 428 条有效乘客路径选择信息为检验数据，检验多项 Logit 模型的预测性能，其结果如表 3.5 所示：

表 3.5 多项 logit 模型预测性能

OD 路径	观测量	预测量	预测路径被选比例	MAPE
A-1	2	1	0.23%	50%
A-2	22	25	5.84%	13.6%
A-3	18	15	3.50%	16.7%
A-4	43	48	11.21%	11.6%
B-1	10	7	1.64%	30%
B-2	0	1	0.23%	X
B-3	75	68	15.89%	9.3%
B-4	10	8	1.87%	20%
C-1	13	17	3.97%	30.7%
C-2	1	1	0.23%	0
C-3	46	40	9.35%	13%
C-4	4	2	0.47%	50%
D-1	0	1	0.23%	X
D-2	14	12	2.80%	14.2%
D-3	16	14	3.27%	12.5%
D-4	39	45	10.51%	15.3%
E(F)-1	18	14	3.27%	22.2%
E(F)-2	13	15	3.50%	15.3%
E(F)-3	37	43	10.05%	16.2%
E(F)-4	18	21	4.91%	16.6%
1-C	8	9	2.10%	12.5%
1-E(F)	5	6	1.40%	20%
2-D	10	9	2.10%	10%
2-E(F)	6	6	1.40%	0

注：MAPE = |观测量-预测量| / 观测量 \* 100%；预测路径被选比例=预测量/样本总数\*100%。

利用多项 Logit 模型对乘客轨道交通站厅路径选择进行建模，较为准确的反映了乘客轨道交通站厅路径的选择偏好，24 条路径的绝对平均百分比误差为 18.2。

据此，根据表 3.5 的预测结果，可以获得站厅内各条路径被选择的概率。

### 3.1.3 乘客站内行走时间分布规律

本小节的主要研究目的是挖掘乘客在站内各个路径上的行走时间分布规律，即求出乘客在站内各个路径上的行走时间概率密度函数。该模型输入的基础数据集是乘客在车站站内行走的时间。

#### 3.1.3.1 对数正态分布函数

目前，对乘客站内行走时间规律的研究多集中在换乘通道。在前人的研究中，多数学者认为换乘通道的行走时间服从对数正态分布。杜鹏等<sup>[39]</sup>在研究换乘通道内乘客的行走时间规律时，在以北京地铁作为研究对象进行实地调查和数据分析后得出结论：乘客在通道内的行走时间近似服从对数正态分布，其均值和方差与换乘通道的距离相关。赵宇刚<sup>[40]</sup>亦以北京地铁为实地调查对象，在对换乘乘客步行速度和换乘时间的关系进行分析之后，发现乘客在单一换乘设施处及全程的走行时间都

路径的概率，认为乘客实际选择了概率最大的路径。石俊刚等<sup>[14]</sup>提出了一种基于 AFC 数据的乘客出行路径选择比例估计方法，运用单路径 OD 实际旅行时间数据估计出多路径 OD 间各路径旅行时间的概率分布参数，并结合多路径 OD 实际旅行时间数据，得到各条路径的选择比例。殷锡金<sup>[15]</sup>提出了“鉴识车票乘车路径”理论，先通过计算每张车票的进出站时间差值得出车票的实际通行时间，再将该实际通行时间与 OD 对上的各条路径的基准通行时间做匹配，由此可以明确地鉴别绝大部分的车票乘车路径，但是对于“异途同归”的车票，该文章并未给出相应的鉴别方法。

## 2) 断面客流估计

目前国内对城市轨道交通断面客流估计的研究比较少。大多数研究是运用前文中所提到的“客流 OD 矩阵分配模型”对历史客流进行分配，得到历史断面客流。例如，过秀成等<sup>[16]</sup>利用多方式概率分配模型，将竞争类方式 OD 出行客流量分配到由地面道路和轻轨构成的联合交通网络上去，得到各轻轨车站的上、下客流量，进而推算轻轨线路断面客流量。邵星杰等<sup>[17][18]</sup>提出了轨道交通 AFC 系统中断面客流的计算方法，并以南京地铁 AFC 系统为例，阐述了如何利用已有的交易数据计算全线网所有车站的断面客流，以及如何应用这些断面客流信息。郑丽娟<sup>[19]</sup>通过建立多概率选择客流分布模型及算法，计算出 OD 对间各有效路径的客流分配比例，从而计算车站、断面、线路和线网客流量。这些研究的研究对象为历史断面客流，假定已经获取了完整的 OD 分布信息，没有考虑乘客进站量和其对应的出站客流量的获取在时间上至少相差行程时间间隔。

针对断面客流的实时估计，有些学者通过引入短时交通流预测的方法进行预测。谢婉泽<sup>[20]</sup>将城市轨道交通客流以周为周期划分，使用最近一周的历史断面客流作为训练样本，运用嵌入式灰色神经网络组合模型对下一周期的客流进行短时预测，即得到当前的断面客流短时预测量，并得到断面客流量的变化趋势。朱雷<sup>[21]</sup>通过研究历史客流数据，并在获取实时列车运行信息和实时乘客交易信息的基础上，提出了一种轨道交通车站客流与断面客流算法；但是该算法假设乘客进出站时间即为上下车时间，没有考虑乘客在站内的行走时间对断面客流的影响，这将会影响计算结果的准确性。徐瑞华等<sup>[22]</sup>考虑到了列车处于动态运行之中，提出了列车与站台客流交互模型，针对单线运营的城市轨道交通构建了断面客流实时估计算法，该“列车与站台客流交互”的想法值得借鉴。孙海瑞<sup>[22]</sup>在此基础上，考虑乘客在站内行走时间对乘客到达站台时间的影响，提出城市轨道交通线路的实时客流推算方法，但是该模型的研究对象依然是针对单线运营的城市轨道交通，因此其适用范围有一定的局限性。

在列车与站台客流的交互领域，目前也取得了一些研究成果。例如，Jan-Dirk Schmöcker<sup>[23]</sup>在研究动态流量分配模型时，考虑到可能有乘客由于车辆过于拥挤而无法上车，提出了“由于拥挤而无法上车的概率”的思想。Poon<sup>[24][25]</sup>提出在列车拥挤条件下，而站台客流本“先到先上”的原则建立动态客流分配模型讨论在高峰拥堵情况下出行者的动态路径选择情况，并用仿真的方法验证模型的有效性。李灿<sup>[26]</sup>在假定站台上初始候车乘客人数为零的情况下，借鉴用户均衡原理以及 Beckmann 交通平衡分配模型，建立了基于用户平衡的站台候车乘客分配模型。赵烈秋，孔繁飚等<sup>[27]</sup>在考虑乘客因车站拥挤而无法上车的基础上，将行程延误时间纳入到客流出行阻抗函数的计算模型之中，构建了拥挤条件下的客流均衡分配模型，并介绍了运用遗传算法求解该模型的步骤。

综上所述，目前对断面客流的计算方法大多不满足“实时估计”的要求，也不能实时掌握网络化运营的轨道交通线网中各站台候车客流、各班次列车载客量以及各断面客流的分布情况。这给运

近似服从对数正态分布。马超云<sup>[41]</sup>对换乘通道内乘客的行走时间进行了抽样调查，发现在换乘通道内乘客行走时间的累积概率分布用 Weibull 函数比较理想。杨涵等<sup>[42]</sup>在对乘客换乘站内不同设施区域的走行速度进行了调查分析后认为，乘客的走行时间在瓶颈处可用平方根正态分布函数描述，在下行楼梯处可用对数正态分布函数描述。

由于乘客在进站通道的走行过程与换乘通道的走行过程类似，不妨假设进站通道的走行时间也服从对数正态分布。

对数正态分布记为  $LN(M_y, \delta_y^2)$ ，定义如下：若  $y = \ln X$  服从正态分布，则称  $X$  服从对数正态分布，其概率密度函数记为  $\ln(x; M_y, \delta_y^2)$ ，对数正态分布曲线如图 3-9 所示。

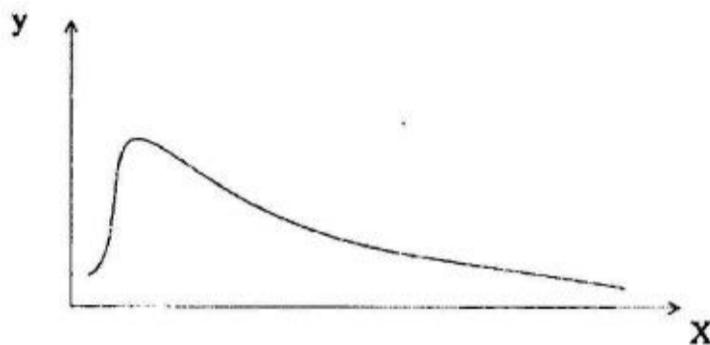


图 3-9 对数正态分布函数示意图

对数正态分布函数具有以下数字特征：

1) 平均值为

$$M_x = \exp(M_y) + \frac{1}{2}\delta_y^2 \quad (3.6)$$

2) 方差为

$$\delta_x^2 = \exp(2M_y + \delta_y^2)(e^{\delta_y^2} - 1) \quad (3.7)$$

3) 概率密度函数  $\ln(x; M_y, \delta_y^2)$  在  $\ln x = M_y$  处达到最大值，即分布的众数为  $e^{M_y}$ 。

### 3.1.3.2 案例分析

本文选取南京地铁一号线珠江路车站作为研究对象，研究其在工作日的早高峰时段（7:00-9:00）的乘客站内走行时间分布规律。数据选取对象是本章 3.1.3.2 小节中对 2014 年 11 月珠江路车站周三早高峰时段 7:00-9:00 进行的四次拍摄调查数据，一共包括 1069 条有效乘客路径动态信息。随机选取路径 3 (B-3) 的 184 条数据作为样本，进行数据分析。

1) 数据分析步骤如下：

运用 Excel 软件，首先对原始数据进行数据预处理，生成 1 列 \* 184 行的数据序列，其中的每个数据代表每个乘客在 B-3 路径上的通行时间的真实值，其中通行时间的真实值等于该名乘客所经历的路径步行时间和设施步行时间之和。再运用 Matlab 软件对数据序列进行对数正态分布函数的拟合，得出其概率分布函数。

2) 结果分析

珠江路站在工作日的早高峰 7:00-9:00 时段的走行时间服从平均值为  $M_y = 1.4145$ ，方差为

$\delta_y^2 = 0.8203$  的对数正态分布。其分布函数为  $f(t) = \frac{1}{0.8203t * \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - 1.4145)^2}{2 * 0.8203^2}\right]$ 。

### 3.2 换乘客流分布规律

换乘客流与进站客流不同，进站客流量可以通过 AFC 系统实时检测出来，而换乘客流只能通过累加各班次列车上的下车客流得出。以某一班次的列车为研究对象，当列车到达某换乘站时，在停站时间内，列车上的乘客下车，直到换乘乘客和出站乘客全部下车或者停站时间结束；在该列列车驶离该换乘站之后，到下一班次的列车进入该换乘站之前，下车客流为零。因此，单次列车的下车客流的到达具有周期性，周期长度为该线路的列车发车时间间隔。

根据以上的描述，可知单次列车的下车客流的到达函数可用示意图 3-10 表示。

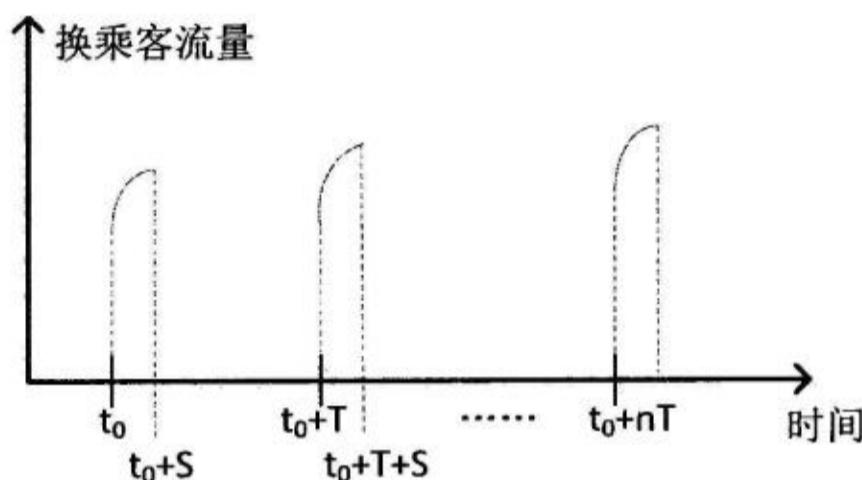


图 3-10 换乘客流到达函数示意图

其中， $t_0$  为该线路上某列列车到达该换乘站的时刻； $S$  为停站时间间隔； $T$  为列车发车时间间隔。

列车停站时间一般在 30 秒左右，且下车乘客与上车乘客共同占有列车停站时间时间间隔，因此，在考虑换乘客流到达规律时，需要考虑两种情况：

①在客流平峰或者次高峰期，即换乘客流量不太大时，在列车到达站台后，只有一部分乘客下车；此时，可以认为列车在到站的时间  $t_0$  上，列车上的所有乘客下车完毕。用公式(3.8)描述上述函数为

$$f(t) = \begin{cases} y_i(t_0), & t = t_0 \\ 0, & t \neq t_0 \end{cases} \quad (3.8)$$

②在客流高峰期，即换乘客流量比较大时，在列车到达站台后，乘客陆续下车，直到列车上的乘客下车完毕或者列车停站时间结束；此时，可以认为上下车乘客共同占有列车停站时间间隔，且乘客上下车的人数在该列车时间间隔上服从均匀分布。用公式 (3.9)描述上述函数为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{S/2} * y_i(t_0), & t_0 + n*T \leq t \leq t_0 + \frac{S}{2} + n*T \\ 0, & t_0 + \frac{S}{2} + n*T < t < t_0 + (n+1)*T \end{cases} \quad (3.9)$$

式(3.8)和(3.9)中:

$f(t)$ ——换乘客流到达分布的概率密度函数;

$y_i(t_0)$ ——在时刻  $t_0$  其他线路的列车在车站  $i$  下车的实时人数;

$S$ ——列车停站时间间隔;

$T$ ——列车发车时间间隔。

在本文所建的断面客流估计模型中, 认为其他线路在换乘站  $i$  的下车人数  $y_i(t_0)$  就是  $t_0$  时刻其他线路上的列车乘客换乘至本线路的人数, 在理论上, 可以认为这些换乘乘客全部通过换乘通道到达本线路的站台, 再按照 OD 分配比例, 一部分人从该站出站, 一部分人换乘至其他线路, 一部分人换乘到本线路。其中,  $t_0$  时刻其他线路上的列车乘客在换乘站  $i$  的下车人数  $y_i(t_0)$  可以运用本文即将建立的实时断面客流估计模型进行计算。

### 3.3 客流到达站台分布

#### 3.3.1 客流到达站台分布模型

结合地铁站进站客流以及换乘客流的分布规律, 结合乘客站内行走规律, 可以得出客流到达站台实时人数。在本章 3.1 节对乘客站内行走时间分布规律的研究中, 以闸机和楼梯/自动扶梯作为客流的起讫点, 也就是说, 默认乘客在结束楼梯/自动扶梯的行走之后就已经到达站台。因此, 这里所说的站台, 不是单指轨道交通某一条线路上的上行或者下行的站台, 而是轨道交通某一条线路在某个车站的上下行站台之和。乘客在到达站台之后, 根据自己要去的目的地, 选择在上行或者下行的站台上等候列车到来。

进站客流到达站台实时人数的计算方法如下:

假设该统计时段的起点为 0 时刻。在车站  $i$ , 从进站闸机至站台, 有  $k$  条路径, 每条路径被选概率为  $U_u (u=1, 2, \dots, k)$ 。那么, 在任意时刻  $t_0 (t_0 < t_1)$  由车站  $i$  进站, 并于时刻  $t_1$  之前抵达站台的乘客数:

$$S_i(t_0, t_1) = \sum_{u=1}^k y_i(t_0) * U_u * P_{i,u}(t_0, t_1) \quad (3.10)$$

式中:

$S_i(t_0, t_1)$ ——在时刻  $t_0$  由车站  $i$  进站并于  $t_1$  时刻之前抵达站台的人数;

$y_i(t_0)$ ——在时刻  $t_0$  由车站  $i$  进站的实时进站人数;

$U_u$ ——车站  $i$  中每条进站路径被选择的概率;

$P_{i,u}(t_0, t_1)$ ——在时刻  $t_0$  从车站  $i$  进站的乘客经过路径  $u$  并于时刻  $t_1$  之前抵达站台的概率。

则从该统计时段的起点开始，车站*i*的实时进站客流人数可以表示为：

$$S_i(t_1) = \int_0^{t_1} S_i(t_1, t_0) dt_0 \quad (3.11)$$

由于人类步行速度具有最大值，因此，乘客在某固定路径上的行走时间具有最小值。假设乘客在路径u的最小行走时间为 $t_{\min,u}$ ，则能够在 $t_1$ 时刻到达站台的乘客最晚需要在时刻 $t_1 - t_{\min,u}$ 刷卡。于是，公式(3.11)可以表示为：

$$S_i(t_1) = \int_0^{t_1 - t_{\min,u}} S_i(t_1, t_0) dt_0 = \sum_{u=1}^k \int_0^{t_1 - t_{\min,u}} y_i(t_0) * U_u * P_{i,u}(t_0, t_1) dt_0 \quad (3.12)$$

假设乘客在车站*i*站内路径u上的行走时间概率密度函数为 $z_{i,u}(t)$ ，则：

$$P_{i,u}(t_1, t_0) = \int_{t_{\min,u}}^{t_1 - t_0} z_{i,u}(t) dt \quad (3.13)$$

那么，公式(3.12)可以写成：

$$S_i(t_1) = \sum_{u=1}^k \int_0^{t_1 - t_{\min,u}} y_i(t_0) * U_u * \left( \int_{t_{\min,u}}^{t_1 - t_0} z_{i,u}(t) dt \right) dt_0 \quad (3.14)$$

需要说明的是，根据本章3.1节对乘客站内行走规律的分析，乘客站厅路径选择概率和站内行走时间分布在不同的时间段呈现不同的统计规律，因此在具体计算的时候要注意根据实际的统计时段选取乘客站厅路径选择概率 $U_u$ 和乘客站内行走时间概率密度函数 $z_{i,u}(t)$ 。

以上的算法也可以用来计算也可以用来计算换乘客流到达站台的人数，此时 $y_i(t_0)$ 为其他线路上的某班次列车在车站*i*在 $t_0$ 时刻的实时下车人数。在计算某统计时段内换乘客流到达站台的人数时，需要累加其他所有线路在该统计时段内的所有列车下车人数。

若车站*i*为非换乘站，则到达站台的乘客人数即来自进站客流。若车站*i*为换乘站，则到达站台的乘客为进站客流与换乘客流之和。

根据上述算法，可以算出该统计时段内站台实时到达人数。假设 $[t_i^{j-1}, t_i^j]$ 为相邻两班次列车到达车站*i*的时间间隔，其中， $t_i^j$ 为第*j*次列车到达车站*i*的时刻。

则当车站*i*为非换乘站时，在该时间段内到达站台的乘客人数 $q_i|_{j-1}^j$ 可用下式表示：

$$q_i|_{j-1}^j = S_i(t_i^j) - S_i(t_i^{j-1}) \quad (3.15)$$

当车站*i*为换乘站时，在该时段内到达站台的乘客人数 $q_i|_{j-1}^j$ 可用下式表示：

$$q_i|_{j-1}^j = (S_i(t_i^j) - S_i(t_i^{j-1}))_{\text{进站}} + (S_i(t_i^j) - S_i(t_i^{j-1}))_{\text{换乘}} \quad (3.16)$$

### 3.3.2 案例分析

如前文所述，在实际情况下，每个车站的站厅路径会有非常多条，而每条路径都有自己的行走时间分布函数，因此在计算客流到达站台分布时有很大的计算量。为研究简便，本文将设计案例来验证客流到达站台分布模型算法的有效性。

#### 3.3.2.1 条件假设

- 1) 根据第二章结论中对特征日合理统计时段的划分，本文选取工作日的高峰时段作为研究对象，采用南京地铁 2014 年 11 月 17 日（周一）进站时间为早晨 7: 00-9: 00，进站车站为珠江路地铁站的客流数据作为基础数据，采样间隔为 5 秒。
- 2) 该车站共有 2 个进站闸机，2 个垂直设施。因此，从进站闸机到站台一共有 4 条可选路径。
- 3) 根据 Logit 模型对乘客站厅路径选择结果的标定，以及对数正态分布函数对乘客站内行走时间分布的拟合，假设站内各路径的被选概率和站内行走时间分布的参数如表 3.6 所示。

表 3.6 站内各路径的被选概率和站内行走时间分布的参数设置

	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
被选概率	30%	35%	20%	15%
对数正态分数函数参数 $M_y$	0.8	0.6	1.2	1.4
对数正态分数函数参数 $\delta_y^2$	0.7	1.2	0.9	0.8

- 4) 假设列车发车间隔为 4 分钟，取 7: 00 为 0 时刻。在 4 分钟以后，第 1 班次列车到达站台。
- 5) 由于换乘客流到达站台的计算过程与进站客流类似，因此本算例只对进站客流进行研究。

#### 3.3.2.2 计算结果

按照本章 3.4.1 小节提出的算法，运用 Matlab 对假设数据进行计算，得出结果如下：

由于列车发车间隔为 4 分钟，因此在 2 小时内一共有 30 班列车到达站台。每班列车到达站台时，实时站台人数如图 3-11 所示。

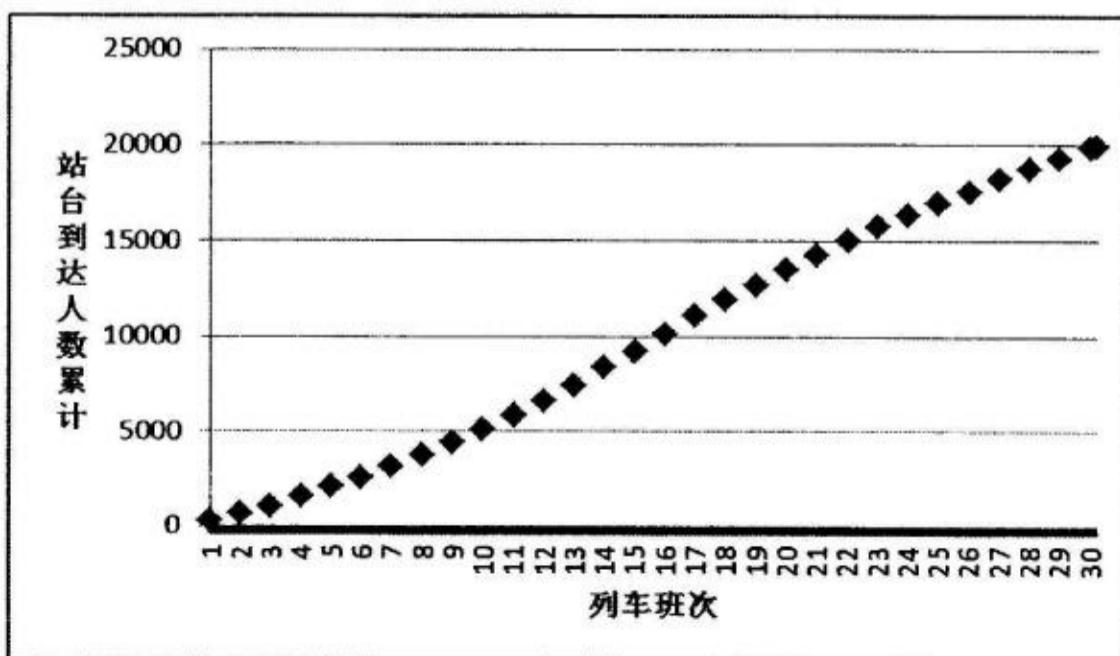


图 3-11 以列车发车间隔统计的实时站台到达人数

需要说明的是，在图 3-11 中，纵坐标的值是从 7: 00 开始，由该车站进站，并于某班次列车到

达之前抵达站台的乘客数，即公式(3.23)中  $S_i(t_0, t_1)$  的值。根据计算，从第 1 班次列车到达站台至第 30 班次列车到达站台的时间段内，到达站台的乘客总量为 19883 人。而此段时间进站人数为 19974，可见，由于站内行走时间的影响，在第 30 班次列车到达站台时，还有部分刷卡乘客未抵达站台。由此证明，计算结果是合理的。

根据公式(3.28)可知，用任一班次列车到达站台时的人数减去前一班次到达站台时的人数，即可得到该相邻两班次列车到达车站的时间间隔内站台上的人数。将该早高峰时段共 2 个小时的进站人数和站台到达人数按照列车发车间隔时间进行统计，如图 3-12 所示。

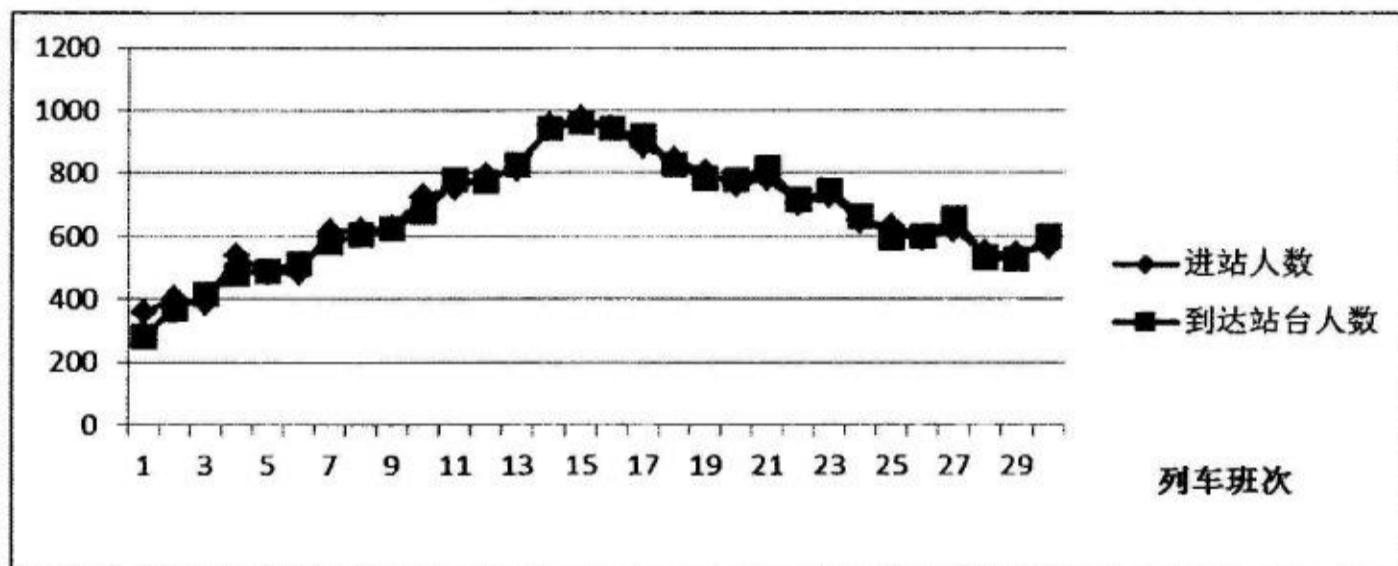


图 3-12 进站人数和站台到达人数按照列车发车间隔时间进行统计图

从图 3-12 中可以看出，在第 1 班次列车到达站台时，站台到达人数明显小于进站人数，这说明还有一部分乘客还分布在进站闸机通往站台的通道内。随着时间的推移，站台到达人数的变化规律与进站人数的变化规律大致吻合。这是比较符合实际的，因为在早高峰期间，站厅内客流量较大，拥挤程度较高，导致乘客在站厅内的行走时间趋同。

由上述算例可见，本文提出的站台到达人数的计算方法具有可行性，能够比较准确的计算出站台的实时到达乘客数。

### 3.4 本章小结

本章从进站客流和换乘客流两个方面对客流到达分布规律做出了研究，再考虑乘客步行时间的影响，最终得出进站客流到达站台的规律。主要工作如下：

- 1) 对于乘客站内行走规律，首先对站内行走规律的影响因素进行分析；然后以对南京地铁珠江路车站的实地行人路径视频调查为案例，运用多项 Logit 模型计算站内各路径的被选概率；最后运用对数正态分布函数拟合乘客在某条路径上的行走时间分布，对调查数据进行处理，得出该车站的乘客在站内各路径上的行走时间分布函数。
- 2) 通过对换乘客流的分析发现，换乘客流的到达具有周期性，周期长度为该线路的列车发车时间间隔。并且指出换乘客流量可以运用本文即将建立的实时断面客流估计模型进行计算。
- 3) 结合进站客流实时统计、换乘客流分布规律和乘客站内行走规律，利用概率论方法推算进站客流和换乘客流到达站台的规律，并由此推算出客流到达站台实时人数。

此页不缺內容

[www.docin.com](http://www.docin.com)

## 第四章 线路 OD 分布概率表推算

根据第三章对实时列车下车人数的计算方法描述可知，下车人数可由列车上实时承载人数和历史 OD 分布情况进行推算。因此，我们需要知道列车上的乘客在该线路上各个站点下车的比例。这些站点下车比例构成的数值表就是该线路 OD 分布概率表。

如果要明确某班次列车在某站台的下车比例，必须首先确定换乘乘客在轨道交通中通过的路径，即换乘乘客在轨道交通线网中依次经过哪些线路上的哪些车站。目前城市轨道交通在网络化运营阶段，大部分车站都可以进行无障碍换乘<sup>[43]</sup>，即乘客无需刷卡出站就可以直接换乘到另外一条线路，由此可知轨道交通 AFC 系统只能记录乘客进出站的 O-D 点，而对乘客在进出车站之间的具体乘坐线路一无所知。

因此，本章首先研究换乘客流 OD 路径分配规律，确定换乘客流在轨道交通中通过的路径，即换乘客流选择哪一条线路的哪一个车站进行换乘。然后根据线网 OD 矩阵表和换乘客流 OD 路径分配结果，推算线路 OD 分布概率表。

### 4.1 换乘客流 OD 路径分配

殷锡金<sup>[15]</sup>提出了“鉴识车票乘车路径”理论，通过分析乘客的进站、换乘和出站所需的时间将车票时间分段处理，最后根据每条路径的基准通行时间与车票实际通行时间做比对，将车票的 OD 路径聚类到某一条 OD 路径上。该理论基于轨道交通的运营事实，而并非人为地对车票 OD 路径按照一定比例进行划分，具有一定的科学性。但是该理论没有对“异途同归”的车票 OD 路径提出分配方法。

本文借鉴“鉴识车票乘车路径”理论，并加以改进，以确定换乘客流的路径选择。基本原理是，首先确定某 OD 对的所有可选路径，为后续分析提供基础输入数据。然后计算每条路径的基准通行时间，并将实际观测的 OD 通行时间样本作比对，运用聚类分析方法把客流分配到基准分类中。对于那些无法通过基准通行时间进行区分的 OD 客流，引入结构化模型吸引权系数法，运用这些 OD 可选路径上的车站在特定时间段内进出站人数生成相应的吸引权系数，然后考虑各路径途径的车站数和换乘次数等其它因素，最后推算各路径客流的概率，从而实现对特定 OD 对上客流的完整分配。

无障碍换乘条件下客流 OD 路径分配的流程图如图 4-1 所示。

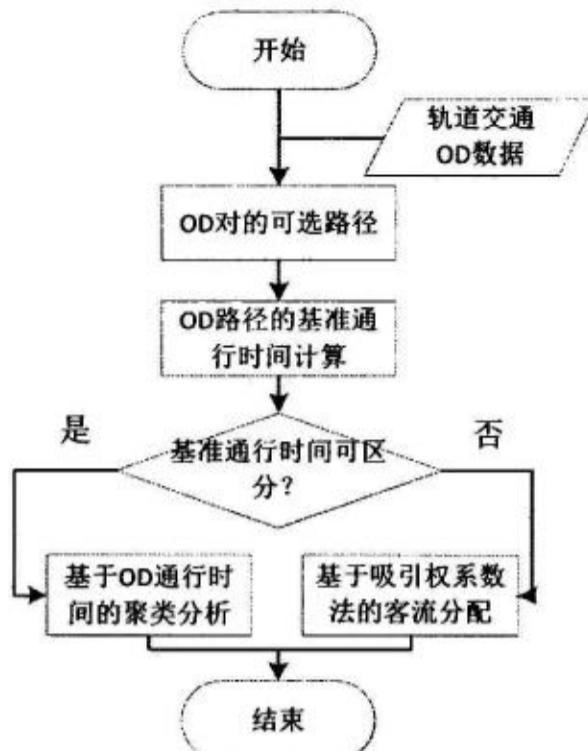


图 4-1 无障碍换乘客流路径分配流程图

#### 4.1.1 换乘客流 OD 路径分配的主要步骤

##### 4.1.1.1 OD 对的可选路径

要对无障碍换乘客流进行分配，针对特定的 OD 区间必须首先生成初始的可选路径，也就是要在线网中寻找所有从 O 点到 D 点所有可能的路径，如图 4-2 所示的路径情况。

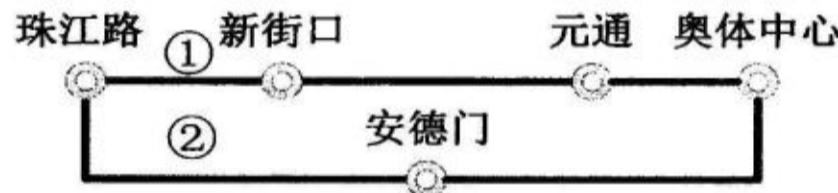


图 4-2 OD 对路径示意图

##### 4.1.1.2 OD 路径基准通行时间

OD 路径基准通行时间指的是在特定的一个时间段内，通过某 OD 可选路径所需要花费的标准时间。即使对于同一线路同一 OD 区间，不同特征日不同时段的 OD 路径基准通行时间可能是不同的。另外，天气、线路故障、重大活动等各种外部因素也有可能对某一 OD 路径的基准通行时间产生影响。因此，OD 路径基准通行时间的计算必须结合不同特征日不同特征时段的划分，以取得最好的准确性。

OD 路径上实际通行时间  $\Delta T$  的计算方法：

$$\Delta T = (\text{出站的时间}) - (\text{进站的时间}) \quad (4.1)$$

对  $\Delta T$  进行时间段分析，可将  $\Delta T$  划分成四部分时段，即

$$\Delta T = \Delta T_{\text{进站}} + \Delta T_{\text{乘车}} + \Delta T_{\text{换乘}} + \Delta T_{\text{出站}} \quad (4.2)$$

式中：

$\Delta T_{\text{进站}}$  —— 乘客从进站检票到上车的时间段；

$\Delta T_{\text{乘车}}$  ——乘客在列车上的所有时间，这段时间包括乘客在所有线路的列车上的时间之和，在数值上等于列车运行表中乘客经历的所有车站间车辆运行时间之和；  
 $\Delta T_{\text{换乘}}$  ——乘客从前一条线路下车到下一条线路的列车上车前的时间段之和，若乘客在整个出行时间内没有换乘，则  $\Delta T_{\text{换乘}}=0$ ；  
 $\Delta T_{\text{出站}}$  ——乘客从最后一条线路下车到检票出站的时间段。

在理解 OD 路径上通行时间  $\Delta T$  的基础上，想要计算出 OD 路径的基准通行时间，就要有效利用真实的客流数据。在计算每条 OD 路径基准通行时间时，可以把该路径分拆成原子区间，乘客在本区间上无须换乘就可以从起始车站直达终点车站，即  $\Delta T_{\text{换乘}}=0$ 。得到该原子区间后，对 AFC 系统中该时段该原子区间上的进出站客流数据进行挖掘，计算客流通行时间均值。然后，将某条 OD 路径上的多条原子区间合并，考虑乘客进出站行走时间与换乘所需时间的差值，得到该条 OD 路径的基准通行时间。

综上所述，某 OD 路径的基准通行时间  $\mu$  的计算公式可描述为：

$$\mu = \sum_{i=1}^n (r_i + \Delta t_1 + \Delta t_2) \quad (4.3)$$

式中：

$i$  ——OD 路径上某一特定原子区间；

$r_i$  ——在该统计时段内，在原子区间  $i$  上的客流通行时间均值；

$\Delta t_1$  ——进出站时间调整系数；

$\Delta t_2$  ——换乘时间调整系数。

$r_i$  可以由公式 (4.4) 算出。

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^{c_i} T_j}{c_i} \quad (4.4)$$

其中： $T_j$  为乘客  $j$  在原子区间  $i$  上的客流通行时间； $c_i$  为在统计时段内，在原子区间  $i$  上的客

流总量； $\sum_{j=1}^{c_i} T_j$  为在统计时段内，在原子区间  $i$  上的客流通行时间总和。

#### 4.1.1.3 OD 对聚类分析

在确定 OD 区间的多条可选路径和各路径在该统计时段内的基准通行时间之后，就可以对 OD 客流进行分配。其基本原理是根据 OD 可选路径的基准通行时间把 OD 区间上的客流分配到不同的

营管理部门进行实时运营计划调整和改善轨道交通系统的服务水平带来了不便。因此本文将提出无障碍换乘条件下的实时断面客流估计模型，希望能解决这一问题。

### 1.3 论文研究内容及意义

本文研究的对象是无障碍换乘条件下的轨道交通线网中的断面客流估计。基本原理是根据历史运营 OD 数据，对实时客流进行动态 OD 矩阵分配，并通过实时计算各站台的上车人数和下车人数，推算列车的实时载客量，进而得出一定统计时段内各区间断面的断面客流。

由于轨道交通线网包含几十个车站并且每日客流量巨大，因此断面客流估计需要以线网结构、全部车站信息、列车运行时刻表、乘客在各车站内的行走特性等众多数据为输入数据，并且以强大的计算机运算能力为支撑。可见，计算非常复杂。本文的研究重点在于建立实时断面客流的估算方法，因此，在建立模型之后，只选用简单数据验证算法的可行性情况，而不对实际的轨道交通断面客流做出运算。

本文的主要研究内容包括以下几部分：

#### 1) 城市轨道交通客流线网 OD 分布规律分析

该研究的主要目的是分析轨道交通进站车站与出站车站间乘客交通出行量的空间分布规律。该研究的主要内容包括：①基于 AFC 系统采集的历史运营客流数据，提取客流线网 OD 矩阵；②采用聚类分析的方法，研究各特征日对站间 OD 矩阵分布统计的合理统计时段；③采用简单时间序列预测方法，确定各统计时段内站间客流的 OD 分布规律。

#### 2) 城市轨道交通客流到达站台规律分析

城市轨道交通的站台上可能出现两类客流，一种是进站客流，另一种是换乘客流。结合乘客进站乘车和换乘的过程可知，计算站台实时到达人数的关键因素是实时进站乘客人数、实时换乘客流到达人数和乘客在站内的行走时间分布规律。该研究的主要内容包括：①通过挖掘进站交易记录，得出实时进站客流人数；②通过分析乘客站内行走规律的影响因素和客流行走特性，研究乘客站内行走规律，进而得出站内各路径被选概率和乘客在各路径上的行走时间分布函数；③通过分析换乘客流的到达规律，推算出实时换乘客流到达人数的计算方法；④结合进站和换乘客流分布规律以及乘客站内行走规律，利用概率论知识推演客流到达站台的规律，即站台的实时候车人数。

#### 3) 线路 OD 分布概率表推算

该研究的主要目的是分析各班次列车上的乘客在线路上各车站的下车比例。研究的主要内容包括：①根据乘客的实际通行时间和 OD 可选路的基准通行时间，确定换乘客流在轨道交通线网中的通行路径，将换乘客流分配到各条 OD 可选路径上；②结合轨道交通线网 OD 矩阵和换乘客流的分配方法，运用数学方法推算线路 OD 分布概率表。

#### 4) 构建无障碍换乘条件下的城市轨道交通实时断面客流估计模型

该研究的主要目的是针对无障碍换乘条件下的轨道交通线网构建实时断面客流估计模型。研究的主要内容包括：通过计算统计时段内到达站台乘客的上车情况以及上车后在各站台的下车比例来估计断面客流。

论文研究的理论和现实意义可概括如下：

路径区间（即分类）上。

根据第二章中对聚类分析的描述可知，此类问题适合运用聚类分析来解决。根据轨道交通无障碍换乘条件下的 OD 客流特点，选取 k-means 算法<sup>[44]</sup>进行聚类处理。将 OD 对的可选路径数设为分类数  $k$ ，将各 OD 路径的基准通行时间设为各类的初始中心点。K-means 算法是一种逐点迭代动态聚类算法<sup>[45]</sup>，在其计算过程中，当一个样本按照一定规则划分到某一聚类后，将重新计算该聚类的中心点（即聚类的均值），然后以该新的中心点为基准再一次进行样本聚类运算。这个过程将一直重复，直到误差函数收敛。

应用 k-means 聚类方法对无障碍换乘条件下的客流路径进行聚类，基本步骤如下：

- 1) 选取某一个统计时段，然后获取该统计时段内 OD 区间上的乘客交易记录数据集  $N$ ，即从  $O$  点进站且  $D$  点出站所有客流数据，按照公式（4.1）算出其实际通行时间；
- 2) 提取该 OD 对的所有可选路径，计算各路径的基准通行时间；
- 3) 定义聚类分析的初始分类数  $k$ ，即该 OD 对的可选路径数。如果有两条可选路径的基准通行时间差别不大（可以定义为差别小于 10%），则认为二者不可区分，那么合并两条路径。假设合并后的 OD 可选路径数为  $m$ ，则  $m \leq k$ 。对于不可区分的两条路径，运用下文中的吸引权系数法对客流进行再分配，最后合并聚类分析的结果；
- 4) 对于确定好的分类数  $m$ ，将各类的基准通行时间设为该类的初始中心点，运用 k-means 算法进行聚类分析，得到各路径客流的分配概率。

#### 4.1.1.4 聚类的不适应性处理

聚类分析法要求各个分类的初始中心点之间有明显的差别，因此，假如两个聚类中心点是不可区分的，就会导致聚类的误差函数无法收敛，分析结果无法达到全局最优<sup>[46]</sup>。由于本文以 OD 可选路径的基准通行时间作为初始中心点，而轨道交通线网中的两条 OD 可选路径可能具有相同或者相似的基准通行时间，所以对于这种情况，不能使用聚类分析来划分客流路径。

朱从坤等<sup>[47]</sup>和周雪梅等<sup>[48]</sup>在研究公交客流 OD 反推方法时发现，运用公交站点的上下车客流产生结构化模型吸引权系数，能够在反推公交客流 OD 时保证操作便捷性和高可靠性。因此，本文将吸引权系数模型针对轨道交通加以改进，对基准通行时间无法区分的 OD 路径进行客流的再一次分配。

改进后的吸引权系数算法描述：

用 OD 可选路径上的全部车站在特定时间段内进站总人数和出站总人数将各路径间的关联性质数量化，定义  $F_{ij}$  为路径  $i$  上各车站与路径  $j$  上各车站的关联系数<sup>[49]</sup>，即吸引权系数，定义矩阵：

$$F_{ij} = \begin{cases} 10 \log^U_{T_i}, T_i \neq 0, 1 \text{ 且 } U_j \neq 0, 1 \\ 0, T_i = 0, 1 \text{ 或 } U_j = 0, 1 \end{cases} \quad (4.5)$$

式中：

$T_i$ ——路径  $i$  上各车站的进站总人数， $T_i = \sum_{k=1}^{n_i} I_k (k = 1, 2, \dots, n)$ ，其中， $I_k$  为车站  $k$  的进站人数，

$n_i$  为路径  $i$  上的车站总数;

$U_j$  ——路径  $j$  上各车站的出站总人数,  $U_j = \sum_{k=1}^{n_j} O_k (k=1, 2, \dots, n_j)$ , 其中,  $O_k$  为车站  $k$  的出站人数,  $n_j$  为路径  $j$  上的车站总数。

接着, 用路径途径车站总数  $S$  和路径上的换乘次数  $L$  对系数  $F_{ij}$  进行加权, 得到新矩阵  $X_{ij}$ :

$$X_{ij} = F_{ij} * \frac{S_j L_j}{S_i L_i} \quad (4.6)$$

最后, 各路径上客流概率的计算方法如下:

$$Y_i = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} X_{ij}}{\sum_{k=0, j=0}^{n-1} X_{kj}} * 100\% \quad (4.7)$$

其中:  $n$  为该 OD 对的可选路径总数。

#### 4.1.2 客流分配案例

在详细描述了轨道交通无障碍换乘客流路径分配的主要步骤之后, 接下来本文将进行实例求解。本部分内容以 2014 年 11 月 18 日 (工作日) 早高峰时段 7:30-8:30 的南京地铁实际运营的客流数据为基础数据。由于南京地铁线网结构较为简单, 因此本案例尽量在选取 OD 时考虑路径较多的 OD, 最终将 OD 取奥体中心->珠江路, 如图 4-3 所示。



图 4-3 OD 区间示意图

##### 4.1.2.1 OD 对的可选路径计算

由于南京地铁线网结构比较简单, 因此可根据穷举法参照图 4-3 得出 2 条可选路径, 如表 4.1 所示。

表 4.1 路径表

OD 对	路径编号	换乘站	换乘次数	途经线路	途径车站
奥体中心->珠江路	路径 1	新街口、元通	2	10, 2, 1	奥体中心、元通、奥体东、兴隆大街、集庆门大街、云锦路、莫愁湖、汉中门、上海路、新街口、珠江路
	路径 2	安德门	1	10, 1	奥体中心、元通、中胜、小行、安德门、中华门、三山街、张府园、新街口、珠江路、

以本节中所选 OD 对（奥体中心->珠江路）为例，本次客流分配的主要目的是计算 OD 区间中乘客通过表 4.1 所示各条路径的概率，进而得到 OD 区间各条路径上客流分配量。

#### 4.1.2.2 基准通行时间计算

对于这 2 条可选路径集，首先要把路径划分为原子区间（乘客在该区间上无需换乘即可由起点直达至终点），然后根据 AFC 系统历史数据，统计各原子区间客流通行时间均值。在这 2 条可选路径集中，路径 1 途径 3 条线路，路径 2 途径 2 条线路，因此可以得到 5 条原子路径，其相关数据计算结果如表 4.2 所示：

表 4.2 OD 对的原子区间通行时间

路径编号	原子区间	本原子区间所属线路	换乘站	通行时间均值（分钟）
路径 1	奥体中心->元通	1 号线	元通	6.77
	元通->新街口	2 号线	元通、新街口	23.36
	新街口->珠江路	10 号线	新街口	4.45
路径 2	奥体中心->安德门	1 号线	安德门	16.74
	安德门->珠江路	10 号线	安德门	14.32

对于每段原子区间，通行时间由三段组成  $\Delta T = \Delta T_{\text{进站}} + \Delta T_{\text{乘车}} + \Delta T_{\text{出站}}$ 。而乘客在步行和候车时间，可以近似等于在整个 OD 区间上的换乘步行时间和换乘候车时间，即不需要再次加权时间参数  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ 。这样，只要合并各原子区间的通行时间均值，即可得到 OD 对的可选路径的基准通行时间，如下表 4.3 所示：

表 4.3 OD 对的可选路径的基准通行时间

路径编号	换乘站	原子区间通行时间之和	基准通行时间（分钟）
路径 1	元通、新街口	6.77+23.36+4.45	34.58
路径 2	安德门	16.74+14.32	31.06

#### 4.1.2.3 换乘客流路径分配计算

根据各条路径的基准通行时间，对 OD 客流的实际通行时间进行聚类分析。取 OD 对为珠江路->奥体中心、在 2014 年 11 月 17 日至 2014 年 11 月 21 日共 5 个工作日的 7: 30-8: 30 的客流数据，

运用 SAS 软件进行分析，输入数据共 162 条，使用 k-means 聚类方法，分类数  $k=2$ ，对应上一小节分析出的分类数。SAS 软件的输出结果如图 4-4 所示：

```
FASTCLUS Procedure: Replace=FULL Radius=0 Maxclusters=2
Maxiter=10 Converge=0.02
```

#### Initial Seeds

Cluster	X1
1	34.5800
2	31.0600

Minimum Distance Between Initial Seeds = 3.52

#### Relative Change in Cluster Seeds

Iteration	Criterion	1	2
1	3.7515	0.2775	0.2871
2	1.7046	0	0

Convergence criterion is satisfied.

Criterion Based on Final Seeds = 1.7046

#### Cluster Summary

Cluster	Frequency	RMS Std Deviation	Maximum Distance from Seed to Observation
1	53	1.7209	3.2685
2	109	1.7718	3.3826

#### Nearest Cluster Distance Between Cluster Centroids

1	2	5.1289
2	1	5.1289

#### Statistics for Variables

Variable	Total STD	Within STD	R-Squared	RSQ/(1-RSQ)
X1	3.038273	1.754014	0.676240	2.088705
OVER-ALL	3.038273	1.754014	0.676240	2.088705

Pseudo F Statistic = 71.02  
Approximate Expected Over-All R-Squared = 0.76527  
Cubic Clustering Criterion = -1.878

#### Cluster Means

Cluster	X1
1	39.0815
2	33.9526

图 4-4 SAS 程序对无障碍换乘客流路径分配的处理结果

根据聚类结果，结合上一小节的路径基准通行时间，得到各路径分配比如表 4.4 所示：

表 4.4 无障碍换乘客流路径分配分类比例表

路径编号	初始中心点(分钟)	结果中心点(分钟)	样本数	百分比
路径 1	34.58	39.08	46	28.40%
路径 2	31.06	33.95	116	71.60%

由上表可以看出，对于 OD 区间（珠江路->奥体中心）在早高峰时段通过路径 2 到达终点的概率较大，其平均通行时间也较短，而通过路径 1 到达终点的概率较小。本案例中，聚类分析的结果

较好，因此无须再使用吸引权系数法对无法进行聚类的路径进行分配。

## 4.2 线路 OD 分布概率表推算

线路 OD 分布概率表，指的是在某条线路上，客流从线路上的一个车站  $i$  进入该线后，从该线路上其他车站  $j$  离开该线的人数与该线上由车站  $i$  进入该线的所有人数的比值所组成的矩阵。

假设该线路共有  $n_0$  个车站，在时间段  $t_m$  内由  $i$  车站进站  $j$  车站出站的乘客数量记为  $S_{ij}^m$ ， $t_m$  时段

内  $i$  车站进站的乘客总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ 。因此在时间段  $t_m$  内由该线路进出站客流构成的一个  $n_0 * n_0$  维 OD

分布矩阵为：

$$S^m = \begin{Bmatrix} S_{11}^m & S_{12}^m & \cdots & S_{1j}^m & \cdots & S_{1n_0}^m \\ S_{21}^m & S_{22}^m & \cdots & S_{2j}^m & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{i1}^m & S_{i2}^m & \cdots & S_{ij}^m & \cdots & S_{in_0}^m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n_01}^m & S_{n_02}^m & \cdots & S_{n_0j}^m & \cdots & S_{n_0n_0}^m \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

式中，矩阵中的元素  $S_{ij}^m$  表示由车站  $i$  进入该线路、车站  $j$  离开该线路的客流人数。

因此，线路 OD 分布概率表推算的关键因素是计算出  $t_m$  时段内由车站  $i$  进入该线且从车站  $j$  离开该线的人数  $S_{ij}^m$ ，以及由车站  $i$  进入该线的乘客总数  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ 。

在无障碍换乘条件下的网络化轨道交通线网中，由线路上的车站  $i$  进入且从线路上的其他车站  $j$  离开该线的客流可以分成四类：

- ①乘客在车站  $i$  刷卡进站，并且在车站  $j$  刷卡出站，此时，车站  $i$  和车站  $j$  分别为乘客路径上的 O 点和 D 点；
- ②乘客在车站  $i$  刷卡进站，经过换乘站  $j$  换乘至其他线路，此时，车站  $i$  为乘客路径上的 O 点，而车站  $j$  为虚拟 D 点（记为  $D'$  点）；
- ③乘客在换乘站  $i$  换乘至本线路，并且在换乘站  $j$  换乘至其他线路，此时，车站  $i$  和车站  $j$  分别为乘客路径上的虚拟 O 点（记为  $O'$  点）和虚拟 D 点（即  $D'$  点）；
- ④乘客在换乘站  $i$  换乘至本线路，并且在车站  $j$  刷卡出站，此时，车站  $i$  为乘客路径上的虚拟 O 点（即  $O'$  点），而车站  $j$  为乘客路径的 D 点。

因此，由线路上的车站  $i$  进入且从线路上的其他车站  $j$  离开该线的乘客人数为这四类客流量之和，可用公式(4.9)表述。

$$S_{ij}^m = U_{ij} + U_{ij'} + U_{ij''} + U_{ij'''} \quad (4.9)$$

式中：

$S_{ij}^m$  ——在特征时段  $t_m$  内，由线路上的车站  $i$  进入且从线路上的其他车站  $j$  离开该线的乘客人数；

$U_{ij}$  ——第①类乘客（即在车站  $i$  刷卡进站，并且在车站  $j$  刷卡出站的乘客）人数；

$U_{ij'}$  ——第②类乘客（即在车站  $i$  刷卡进站，经过换乘站  $j$  换乘至其他线路的乘客）人数，若车站  $j$  为非换乘站，则  $U_{ij'}$  不存在；

$U_{ij''}$  ——第③类乘客（即在换乘站  $i$  换乘至本线路，并且在换乘站  $j$  换乘至其他线路的乘客）人数，若车站  $i$  和车站  $j$  为非换乘站，则  $U_{ij''}$  不存在；

$U_{ij'''}$  ——第④类乘客（即在换乘站  $i$  换乘至本线路，并且在车站  $j$  刷卡出站的乘客）人数，若车站  $i$  为非换乘站，则  $U_{ij'''}$  不存在。

线路 OD 矩阵是在全网 OD 基础上，以客流分配模型将全网 OD 对分配到各有效路径上，并在分配结果的基础上统计得到的<sup>[50]</sup>。在本文的第二章中，已经详细阐述了如何提取特定特征日特定特征时段的客流线网 OD 矩阵表。通过该客流线网 OD 矩阵表，可以知道在该特征时段中，从线网中的某一车站（O 点）到另一车站（D 点）的人数。在本章的 4.1 节中，详细阐述了如何鉴别客流所经过的 OD 路径，以及如何计算某 OD 对中各条可选路径被选择的概率。综合以上各种数据，很容易推算出该特征时段中，每条 OD 可选路径上的乘客人数，如表 4.5 所示，其中，“分配量”一列表示每条 OD 可选路径上的乘客人数。接着，将每条 OD 可选路径分拆成原子区间，在该原子区间上不存在可以换乘的轨道车站，乘客在本区间上可以从起点直达终点。易知，每个原子区间上的的乘客人数都等于该条 OD 可选路径上的乘客人数。

表 4.5 客流分布统计样表

OD 记录	可选路径	途径线路	途径车站	换乘次数	选择概率	客流总量	分配量
02-04	1	1	02-04	0	100%	311	311
01-10	1	10, 2, 1	01-02', 02'-09', 09'-10	2	28.4%	84	24
	2	10, 1	01-05', 05'-09	1	71.6%	84	60
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

到这里，我们可以获得每个原子区间的 OD 信息（包括该 O 点和 D 点究竟为实际 O 点和 D 点，还是虚拟 O 点或 D 点）和该原子区间上的乘客人数，在表 4.5 中，分别以“途径车站”和“分配量”

的值表示。经过累加计算，很容易得出公式(4.9)中所描述的四个参数  $U_y, U_{y'}, U_{ij}, U_{ij'}$  的值。

#### 4.2.1 进站客流的线路 OD 分布概率表推算

假设轨道交通的某线路 A 一共有  $n_0$  个车站，该线网一共有  $n$  个车站。对于线路 A 上从车站  $i$  上车且车站  $j$  下车的进站客流量  $S_{ij}^m$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n_0$ )，因此无论车站  $i$  是不是换乘站点，都要求这部分乘客必须是从车站  $i$  刷卡进站的。易知，当  $i = j$  时， $S_{ij}^m = 0$ 。根据公式(4.9)，当  $i \neq j$  时，在计算进站客流量  $S_{ij}^m$  需要分四种情况讨论：

- 1) 若车站  $i$  和车站  $j$  都为非换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij}$ ，此时，由车站  $i$  进站的客流即为线路客流，

车站  $i$  的进站客流总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ ；

- 2) 若车站  $i$  为非换乘站，车站  $j$  为换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij} + U_{ij'}$ ，此时，由车站  $i$  进站的客流即

为线路客流，车站  $i$  的进站客流总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ ；

- 3) 若车站  $i$  和车站  $j$  都为换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij} + U_{ij'}$ ，此时，由车站  $i$  进站的客流为线网客流，

车站  $i$  的进站客流总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ ；

- 4) 若车站  $i$  为换乘站，车站  $j$  为非换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij}$ ，此时，由车站  $i$  进站的客流为线网客

流，车站  $i$  的进站客流总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ 。

至此，可以计算出由车站  $i$  进入该线且从车站  $j$  离开该线的人数，以及由车站  $i$  进入该线的所有乘客人数，进而推算出进站客流的线路 OD 分布概率表。

#### 4.2.2 换乘客流的线路 OD 分布概率表推算

假设轨道交通的某线路 A 一共有  $n_0$  个车站，该线网一共有  $n$  个车站。对于由其他线路换乘至线路 A、从线路 A 的车站  $i$  上车且车站  $j$  下车的换乘客流量  $S_{ij}^m$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n_0$ )，要求车站  $i$  必须为换乘站，并且这部分乘客必须是从车站  $i$  虚拟进站的而不能是刷卡进站的。

值得注意的是，根据本文 3.2 节对于换乘客流分布规律的描述，本文所构建的断面客流估计模型中“换乘客流”是根据其他线路列车在换乘站的实时下车客流计算而来，而下车客流一部分换乘至了本线路，另一部分直接出站。那部分直接出站的客流，就是当  $i = j$  时， $S_{ij}^m$  的值，很明显，此时

$S_{ij}^m \neq 0$ 。这部分来自其他线路的出站客流，等于所有线路在车站  $i$  刷卡出站的客流减去来自本线路的在车站  $i$  刷卡出站的客流，其用公式表述为  $S_{ij}^m = \sum_{p=1}^n (U_{pi} + U_{pi}) - \sum_{p=1}^{n_0} (U_{pi} + U_{pi})$ ，其中， $p$  为全线网中的车站编号。

根据公式(4.9)，当  $i \neq j$  时，在计算进站客流量  $S_{ij}^m$  需要分两种情况讨论：

- 1) 若车站  $j$  为非换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij}$ ；
- 2) 若车站  $j$  也为换乘站，则  $S_{ij}^m = U_{ij} + U_{ij}$ 。

另外，车站  $i$  的换乘客流总数为  $\sum_{j=1}^{n_0} S_{ij}^m$ 。

至此，可以计算出由其他线路换乘至线路 A、从线路 A 的车站  $i$  上车且车站  $j$  下车的换乘乘客人数，以及由其他线路到达车站  $i$  的所有乘客人数，进而推算出换乘客流的线路 OD 分布概率表。

### 4.3 本章小结

本章提出了线路 OD 分布概率表的计算方法，首先确定了换乘客流在线网中的 OD 路径，然后结合客流的线网 OD 矩阵表，运用数学方法对线路 OD 分布概率表进行推算。具体工作和结论如下：

- 1) 详细介绍了轨道交通无障碍换乘客流 OD 路径鉴别的算法模型，以 OD 可选路径的基准通行时间为分类的依据，对乘客在该 OD 对上的实际通行时间进行聚类分析，辅以吸引权系数法对基准通行时间不可区分的路径进行再处理，最终得出乘客选择每条 OD 可选路径的概率，进而实现对无障碍换乘客流的全部 OD 路径的鉴别；
- 2) 运用无障碍换乘客流的 OD 路径分配结果，结合客流线网 OD 分布矩阵表，提出了线路 OD 矩阵表的具体计算方法。

此页不缺內容

[www.docin.com](http://www.docin.com)

## 第五章 无障碍换乘条件下的实时断面客流估计模型

### 5.1 无障碍换乘条件下的实时断面客流估计模型

在城市轨道交通系统中，列车与站台会相互联系、相互影响。当各班次的列车到达站台时，列车与站台发生客流的交换，站台上乘客上车，列车上有乘客下车。这个过程随着列车的到达与离开将周而复始。各站台上的上车人数与各班次列车到达某车站时的实际载客能力和站台候车乘客数量有关。在列车拥挤或者站台拥挤以及考虑乘客在站内步行时间影响的情况下，站台上的候车乘客不一定能在最快一班列车到达时上车。因此，若以站台到达客流作为上车客流，是不科学的。本文在考虑这种情况之后，针对无障碍换乘条件下的城市轨道交通系统提出了一种实时断面客流估计方法。

#### 5.1.1 模型输入

输入数据包括：①线路结构，包括线路的长度、车站的数量、换乘车站、各车站静态信息等；②列车运行计划，包括列车的发车间隔、站间运行时间、停站时间和开行班次等，需要注意的是，在不同的统计时段内，列车运行计划是不同的，这可以从发布的列车时刻表中获得，另外，本文假定列车的实际运行情况遵照列车运行计划，没有提前到站或者延误发车等情况发生；③站台的实时到达人数，对于非换乘站车站，可以根据第三章提出的算法，运用进站/换乘客流到达分布规律和乘客站内行走时间分布规律来确定站台的实时到达人数；④该时段的线路 OD 分布概率表，可通过第四章提出的计算方法得到。

#### 5.1.2 建模过程

所谓实时断面流量，指的是在某统计时段内线路上任一区间断面上通过的乘客数量，在数值上等于在该统计时段内通过该断面的所有列车载客量之和。其计算方法如图 5-1 所示，BC 断面的客流量  $S_{BC} = X_{AC} + X_{AD} + X_{BD}$ 。参照图 5-1 可知，只要得到每个班次列车在各断面上的客流量后，再将该统计时段内经过某断面的所有列车载客量累加，就可以得到该统计时段的断面客流量。

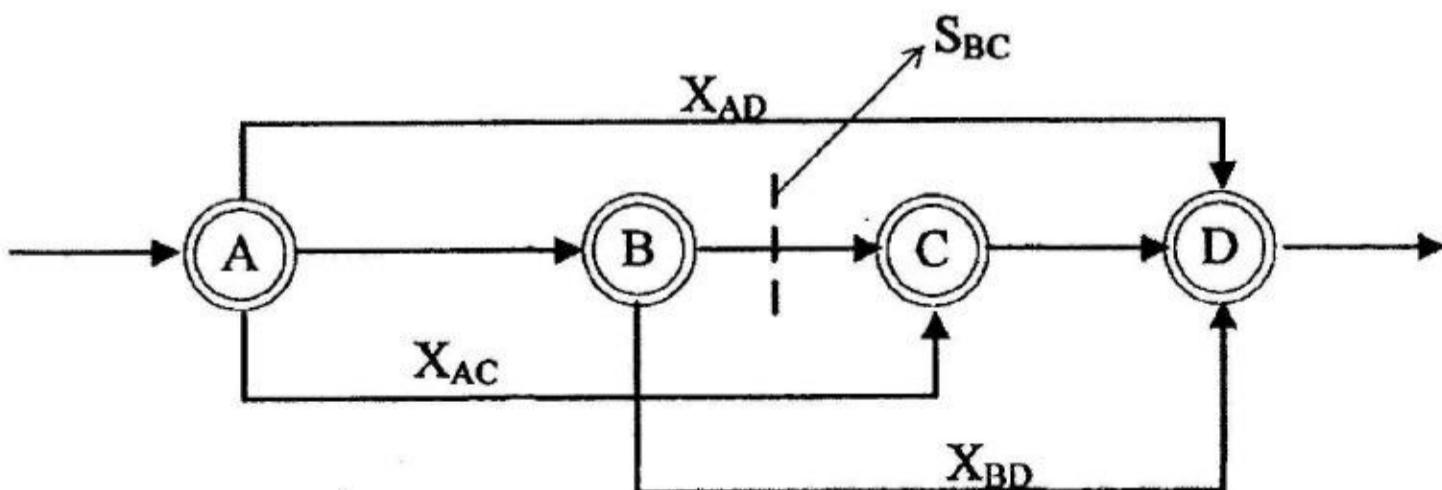


图 5-1 断面客流计算方法示意图

- 1) 是轨道交通短时客流预测理论的基础：断面客流估计数据是断面客流短时预测的基本输入数据，估计方法的合理性关系到预测结果的准确性与可靠性。
- 2) 有利于轨道交通运营与管理：通过研究城市轨道交通换乘客流 OD 路径分配规律，将有助于准确地掌握网络客流分布规律，为轨道交通网络清分和客流量预测等研究提供参考和依据，为运营管理等部门日常调度和列车运行计划编制等工作提供参考。
- 3) 有利于合理的规划线网与车站：我国已进入城市轨道交通的快速发展时期，通过对已有轨道交通运营的城市进行线网断面客流估计，将为轨道新线的规划建设与客流预测提供定量支撑和参考。
- 4) 有利于城市规划与建设：研究城市轨道交通断面客流估计方法对于合理规划、建设和改善城市一体化交通系统有着显著的理论价值和现实意义。通过掌握城市轨道交通网络的客流分布特点，就可以根据轨道交通客流的变化规律对地面道路和轨道交通组成的联合网络进行优化，以达到城市交通整体效率的最大化。

#### 1.4 技术路线图

针对以上内容，本文采取的技术路线图如图 1-1 所示。

各班次列车在某断面上的客流量，等于该列车在到达断面前经过的所有车站的上车人数之和与下车人数之和的差。由此可见，断面客流估计的关键是确定各班次列车在每个车站的上下车人数。乘客在各个站台的下车人数可以根据轨道交通历史数据分析得到的站间 OD 分布比例将各个车站（包括换乘站）的上车人数进行分配得到。而上车人数则由列车到达该站时的剩余载客量和站台上的候车乘客共同决定。

徐瑞华，徐永实<sup>[4]</sup>提出的基于列车与站台交互的预测模型，采用乘客上车比例为联系参数，以列车发车间隔为周期统计站间 OD 矩阵，然后将到达站台的乘客分配到后续的各个车次的列车上。该模型能够比较好的描述轨道交通客流的实时分布情况，具有一定的适用性。但是该模型只针对单线运营的线路进行研究，没有考虑换乘客流对断面客流的影响，因此该模型的适用范围有一定的局限性。

本文在此基础上提出了改进，考虑了换乘客流对断面客流的影响。本文提出的轨道交通断面客流实时估计模型模型建立过程如下：

- 1) 确定列车  $j$  到达车站  $i$  时的站台上候车人数：

$$H_i^j = q_i |_{j-1}^j + q_{\text{留}}^{j-1} \quad (5.1)$$

式中：

$H_i^j$ ——列车  $j$  到达车站  $i$  时，站台上的候车乘客人数；

$q_i |_{j-1}^j$ ——在列车  $j-1$  离开后至列车  $j$  到达车站  $i$  的时间段内，到达站台的乘客人数；

$q_{\text{留}}^{j-1}$ ——列车  $j-1$  离开车站  $i$  时，站台上乘客的剩余量。

- 2) 确定列车  $j$  在车站  $i$  的上车人数：

$$A_i^j = \min(H_i^j, C^j - N_{i-1\text{发}}^j + X_i^j) \quad (5.2)$$

式中：

$A_i^j$ ——列车  $j$  抵达车站  $i$  时的上车人数；

$H_i^j$ ——列车  $j$  到达车站  $i$  时，站台上的候车人数；

$C^j - N_{i-1\text{发}}^j + X_i^j$ ——列车  $j$  到达车站  $i$  时的列车剩余载客量，其中， $C^j$  为列车  $j$  的最大载客量，

$N_{i-1\text{发}}^j$  为列车  $j$  从车站  $i-1$  站台发车时的载客量， $X_i^j$  为列车在车站  $i$  的下车人数。

公式(4.2)的意义是，列车  $j$  抵达车站  $i$  站台时的上车人数为站台候车人数与列车剩余载客量的最小值。

本模型假设，当列车到达站台时，先到达站台的乘客先上车，后到达站台的乘客后上车，并且，每班次列车在到达站台时，至少能将前一时段的站台滞留乘客全部载走。

- 3) 确定列车  $j$  在车站  $i$  的下车人数：

$$X_i^j = \sum_{\mu=1}^{i-1} (A_\mu^j * B_{\mu}^i), \mu \leq i-1 \quad (5.3)$$

式中：

$X_i^j$ ——列车  $j$  抵达车站  $i$  时的下车人数；

$A_u^j$ ——列车  $j$  抵达车站  $\mu$  时的上车人数；

$B|_{\mu}^i$ ——由车站  $\mu$  上车的乘客在车站  $i$  下车的比例，可通过历史数据得到； $A_u^j * B|_{\mu}^i$  表示列车  $j$  上由车站  $\mu$  上车、车站  $i$  下车的人数。

如果车站  $\mu$  是一个换乘站，那么，需要对公式(4.3)中的  $A_u^j * B|_{\mu}^i$  进行换算。当列车  $j$  到达站台时，站台上候车的乘客可能有三种：①列车  $j-1$  离开车站  $\mu$  站台时，站台上乘客的剩余量  $q_{\mu\text{留}}^{j-1}$ ，②在列车  $j-1$  离开后至列车  $j$  到达车站  $\mu$  站台的时间段内，到达站台的进站客流人数  $q_{\mu\text{进站}}|_{j-1}^j$ ，③在列车  $j-1$  离开后至列车  $j$  到达车站  $\mu$  站台的时间段内，到达站台的换乘客流人数  $q_{\mu\text{换乘}}|_{j-1}^j$ 。此时，

$$\frac{q_{\mu\text{进站}}|_{j-1}^j}{q_{\mu\text{换乘}}|_{j-1}^j} = \frac{a_j}{b_j}, \text{ 同理, 前一个时段中 } \frac{q_{\mu\text{进站}}|_{j-2}^{j-1}}{q_{\mu\text{换乘}}|_{j-2}^{j-1}} = \frac{a_{j-1}}{b_{j-1}}。本模型假设在列车到达站台时, 进站客流}$$

和换乘客流按照当前站台上候车人数的比例，混合上车。根据公式(4.2)，当站台上的乘客可以全部上车时， $A_u^j = H_{\mu}^j = q_{\mu\text{留}}^{j-1} + q_{\mu\text{进站}}|_{j-1}^j + q_{\mu\text{换乘}}|_{j-1}^j$ ；当站台上的乘客不可以全部上车时，

$$A_u^j = C^j - N_{\mu-1\text{发}}^j + X_{\mu}^j, \text{ 假设 } q_{\mu\text{留}}^{j-1} \text{ 可以全部上车, 那么车上的进站客流人数为 } (A_u^j - q_{\mu\text{留}}^{j-1}) * \frac{a_j}{a_j + b_j},$$

换乘客流人数为  $(A_u^j - q_{\mu\text{留}}^{j-1}) * \frac{b_j}{a_j + b_j}$ 。此时，列车  $j$  抵达车站  $\mu$  站台时的上车人数成分已经清晰。

另外，根据轨道交通的历史运营经验，每个换乘站点的换乘客流的站间 OD 分布具有较大的规律性，因此，为了简化模型，本文所建立的断面客流估计模型认为，换乘客流从其他线路换乘至本线路时，不再带有原先上车时的 OD 信息，根据历史 OD 分布规律即可推算出这些换乘客流在换乘之后将产生的 OD 路径。

至此，只要将各种客流乘以其对应的  $B|_{\mu}^i$  再进行累加，即可替代公式(4.3)中的  $A_u^j * B|_{\mu}^i$ 。

#### 4) 确定站台乘客滞留量：

$$q_{\mu\text{留}}^j = H_i^j - A_i^j \quad (5.4)$$

式中：

$q_{\mu\text{留}}^j$ ——列车  $j$  离开车站  $i$  时，站台上乘客的剩余量；

$H_i^j$ ——列车  $j$  到达车站  $i$  时的站台上候车乘客人数；

$A_i^j$ ——列车  $j$  抵达车站  $i$  时的上车人数。

在确定上车人数和下车人数之后，很容易可以求得各班列车从各站出发时的载客量  $N_{\text{发}}^j$  及满载率  $\gamma_i^j$  等参数。下面进行详细说明计算方法。

1) 列车  $j$  从车站  $i$  出发时的载客量即为车站  $i$  与车站  $i+1$  之间的断面客流量，计算公式如下：

$$N_{\text{发}}^j = N_{i-1\text{发}}^j - X_i^j + A_i^j \quad (5.5)$$

式中：

$N_{\text{发}}^j$  ——列车  $j$  从车站  $i$  出发时的载客量，显然， $N_{1\text{发}}^j = A_1^j$ ；

$N_{i-1\text{发}}^j$  ——列车  $j$  从车站  $i-1$  出发时的载客量，有  $N_{i-1\text{发}}^j = N_{\text{倒}}^j$ ；

$X_i^j$  ——列车  $j$  在车站  $i$  的下车人数；

$A_i^j$  ——列车  $j$  在车站  $i$  的上车人数。

2) 列车实时满载率为列车实时断面客流量与列车额定载客量的比值。列车  $j$  从车站  $i$  出发时的满载率的计算公式如下：

$$\gamma_i^j = \frac{N_{\text{发}}^j}{D^j} \quad (5.6)$$

式中：

$N_{\text{发}}^j$  ——列车  $j$  从车站  $i$  出发时的载客量；

$D^j$  ——列车  $j$  的定员。

### 5.1.3 模型算法

算法的基本思路是，从轨道交通某线路全天第一次列车运行开始，依次对该线路上各班次列车进行追踪。每班次列车从其经过的第一个站台开始，以此计算个站台的站台到达人数、站台候车人数、下车人数、上车人数、站台乘客滞留量，直至计算完最后一个站的各项指标。然后采取同样的方法对下一班次列车进行计算，直至计算完所有班次的列车，计算结束。算法的流程图如图 5-2 所示。

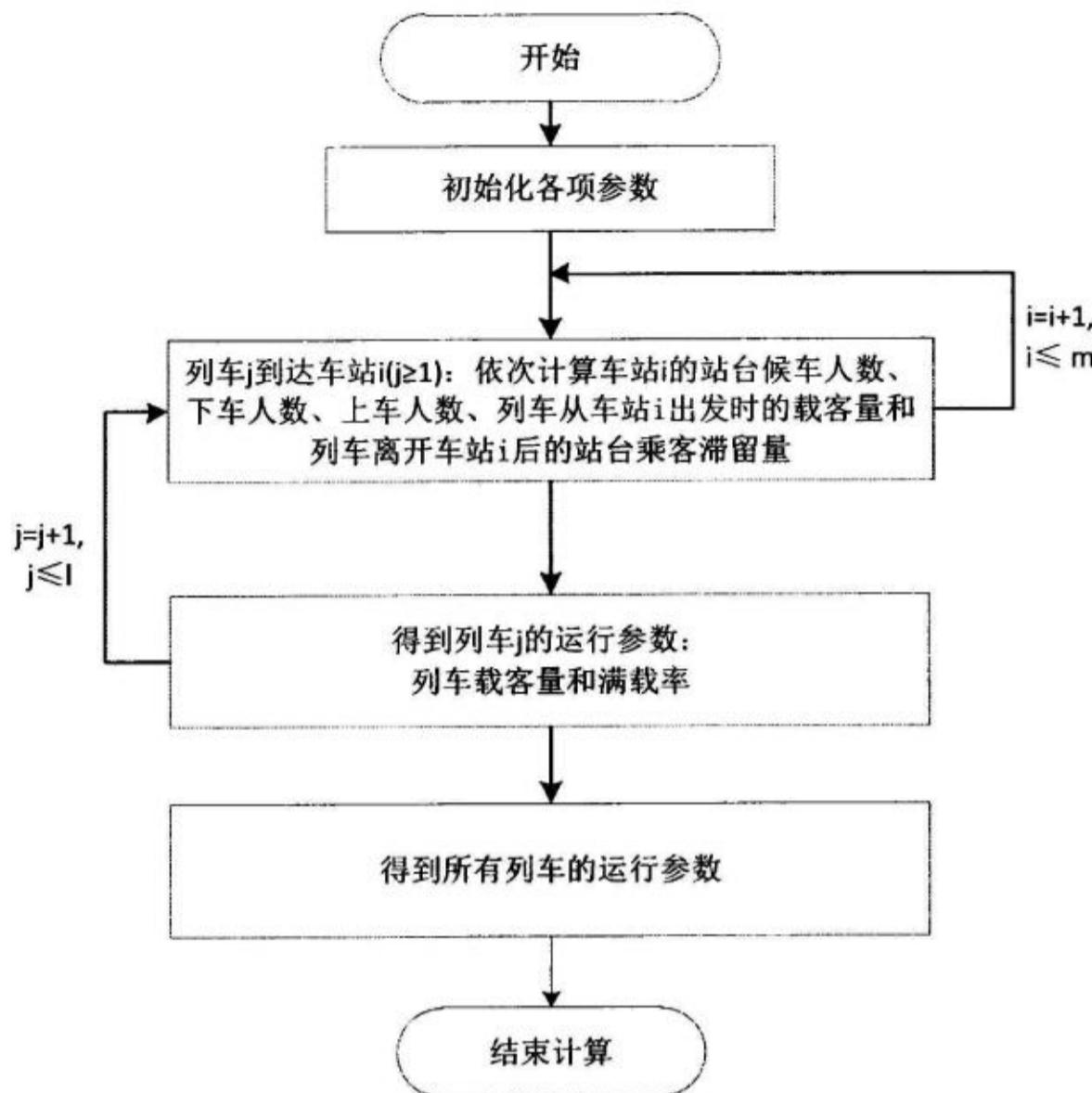


图 5-2 算法流程图

算法的详细步骤如下：

- 1) 运算初始化。①根据列车运行时刻表，获得任一列车  $j$  从任一站台  $i$  出发的时刻  $t_i^j$  ( $i=1,2,\dots,m$ , 全线路共  $m$  个车站); ②各班次列车到达站台 1 时，车上载客量  $N_{1\text{到}}^j=0$  ( $j=1,2,\dots,l$ , 全天共  $l$  班列车运营); ③各班次列车在站台 1 的下客量  $X_1^j=0$ ; ④列车 1 在到达任一车站  $i$  之前，站台乘客滞留量  $q_{i\text{留}}^0=0$ ; ⑤任一列车  $j$  的最大载客量为  $C^j$  ( $j=1,2,\dots,l$ ), 额定载客量为  $D^j$  ( $j=1,2,\dots,l$ ); ⑥制定任一车站  $i$  的 OD 比例表  $B$ ,  $B|_\mu^i$  为该表中的第  $\mu$  行第  $i$  列的数据值，含义为由车站  $\mu$  上车的乘客在车站  $i$  下车的比例，若车站  $i$  为换乘车站，则另有一张换乘 OD 比例表。

- 2) 以列车 1 为跟踪对象，可知  $N_{1\text{到}}^1=0$  且  $X_1^1=0$ 。依据列车 1 到达站台的次序，逐个计算  $N_{1\text{发}}^1=A_1^1=H_1^1$  → 计算  $q_{1\text{留}}^1$  → 计算  $H_2^1$  → 计算  $X_2^1$  → 计算  $A_2^1$  → 计算  $N_{2\text{发}}^1$  → 计算  $q_{2\text{留}}^1$  → 计算  $H_3^1$  → 计算  $X_3^1$  → 计算  $A_3^1$  → 计算  $N_{3\text{发}}^1$  → 计算  $q_{3\text{留}}^1$  ……，依次类推，直至计算完  $q_{l\text{留}}^1$

( $i=1,2,\cdots,m$ ), 此时, 运行参数  $\gamma_i^1$  也全部得到, 其中关键中间参数  $X_i^1 = \sum_{\mu=1}^{i-1} (A_\mu^1 * B|_\mu^i)$ ,

以此类推;

- 3) 以列车 2 为跟踪对象, 依列车 2 到达站台的次序逐个计算  $H_i^2$ 、 $X_i^2$ 、 $A_i^2$ 、 $N_{i\text{发}}^2$ 、 $q_{i\text{留}}^2$  及运行参数  $\gamma_i^2$  的计算过程和前面类似。其中关键中间参数  $X_i^2 = \sum_{\mu=1}^{i-1} (A_\mu^2 * B|_\mu^i)$ , 以此类推;
- 4) 以列车  $j$  为跟踪对象, 依列车  $j$  到达站台的次序逐个计算  $H_i^j$ 、 $X_i^j$ 、 $A_i^j$ 、 $N_{i\text{发}}^j$ 、 $q_{i\text{留}}^j$  及运行参数  $\gamma_i^j$  的计算过程和前面类似。其中关键中间参数  $X_i^j = \sum_{\mu=1}^{i-1} (A_\mu^j * B|_\mu^i)$ , 以此类推。
- 5) 计算完列车  $l$  的所有运行参数后, 计算结束。

## 5.2 无障碍换乘条件下的实时断面客流估计案例

### 5.2.1 数据准备

#### 1) 线路结构

假设某条线路 A 有站 1 至站 6 共 6 个车站, 线路运行方向为上行, 如图 5-3 所示。其中, 站 3 为换乘站, 其他车站为非换乘站; 站 3 为线路 A 与线路 B 交汇的换乘站; 在 S1 至 S5 为线路 A 上的各个断面, 其断面客流是本章要计算的对象。

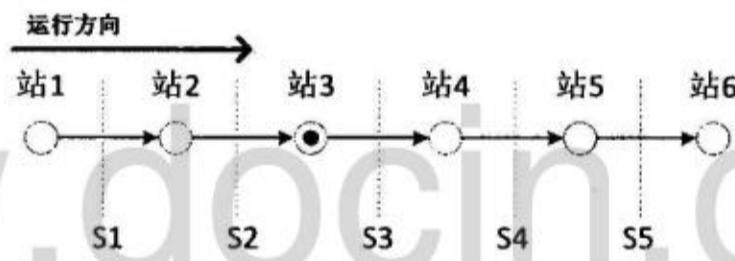


图 5-3 计算线路示意图

#### 2) 列车运行计划

在该统计时段内, 设定列车在任一区间内的运行时间为 2.5 分钟, 发车间隔为 3 分钟, 停站时间为 0.5 分钟。列车采用相同的编组, 每班次列车最大载客量  $C=1500$  人, 额定载客量  $D=1200$  人。时刻 0 为各车站开始运营时间, 各班车抵达站 1 所需时间为 2 分钟。

#### 3) 站台实时到达人数

事实上, 站台的实时到达人数由进站客流实时到达人数和换乘客流实时到达人数组成, 可以通过第三章所述的计算方法得到。由于本章主要研究断面客流估算模型, 为简化计算过程, 不妨以列车发车间隔为时间间隔统计站台上的到达人数, 并且假设在列车 1 到达之前, 各站台上无滞留乘客, 即在该统计时段前到达的乘客已被该时段前到达的列车载走。假设各站台实时到达人数如表 5.1 所示。

表 5.1 各站台实时到达人数

列车班次 站台到达人数	站 1	站 2	站 3		站 4	站 5	站 6
			进站	换乘			
列车 1 到达之前	840	940	600	800	851	980	/
列车 2 到达之前	780	820	475	633	811	1020	/
列车 3 到达之前	825	872	584	778	780	1110	/
列车 4 到达之前	750	840	540	720	800	870	/
列车 5 到达之前	800	860	442	589	766	940	/

## 4) 站间 OD 分布比例

假设各站台进站客流的 OD 分布比例如表 5.2 所示：

表 5.2 各站台进站客流的 OD 分布比例表

出站点 进站点	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6
站 1	0	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1
站 2	0.25	0	0.25	0.15	0.25	0.1
站 3	0.15	0.3	0	0.2	0.2	0.15
站 4	0.1	0.3	0.25	0	0.15	0.2
站 5	0.25	0.2	0.15	0.2	0	0.2
站 6	0.1	0.15	0.25	0.3	0.2	0

由于表 5.2 的研究对象为进站客流，根据本文 2.3 小节对站间 OD 分布表的分析，可知该表对角线上的各值（表示同站进出的客流比值）为零，并且，每一行的 OD 分布比例之和为 1。又由于列车运行方向为上行，即从站 1 开往站 5，因此，表 5.2 中的灰色栏在本次断面客流计算中是用不到的。

假设站 3 上由线路 B 换乘到本线路的换乘客流的 OD 分布比例如表 5.3 所示：

表 5.3 站 3 上由线路 B 换乘至本线路的换乘客流 OD 分布比例

出站点 进站点	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6
站 3	0.2	0.15	0.1	0.2	0.2	0.15

在表 5.3 中可以见到，由站 3 进站且站 3 出站的比例不为零，这是因为该换乘客流的 OD 分布比例表需要搭配线路 B 的列车实时下车人数一起使用。而在线路 B 的列车下车人数，既包括直接从站 3 出站的客流，也包括经由站 3 换乘至本条线路（线路 A）的客流。因此，在本表中，由站 3 进站且站 3 出站的 OD 比例，表示在线路 B 的站 3 下车并且直接出站的人数比例。

## 5.2.2 计算结果

在能充分说明本算法计算过程的前提下，本案例对前 5 班车的运行情况进行了计算。在计算过程中，若出现小数，则按“四舍五入”法作近似取值。

### 1) 各班次列车在各站台上车人数

当某班次的列车抵达某站台时，首先判断该列车的剩余载客量，即列车最大载客量与列车实际载客量及该站下车人数之差，其中，列车实际载客量等于该车站前一个区段的断面客流。然后判断该站台上的候车乘客人数。如果列车剩余载客量大于站台候车人数，则站台上的乘客能够全部上车。如果列车剩余载客量小于站台候车人数，则先判断该站台的乘客滞留量，按照时间的先后让这些滞留的乘客依次上车，再另该时段内到达站台的进站客流（和换乘客流）上车，直至列车满载，此时，站台上将会滞留部分乘客，待到下一班车列车到站时，这部分滞留乘客将会优先上车。

各班次列车在各站台的上车人数计算结果如表 5.4 和图 5-4 所示。

表 5.4 各班次列车在各站台上车人数

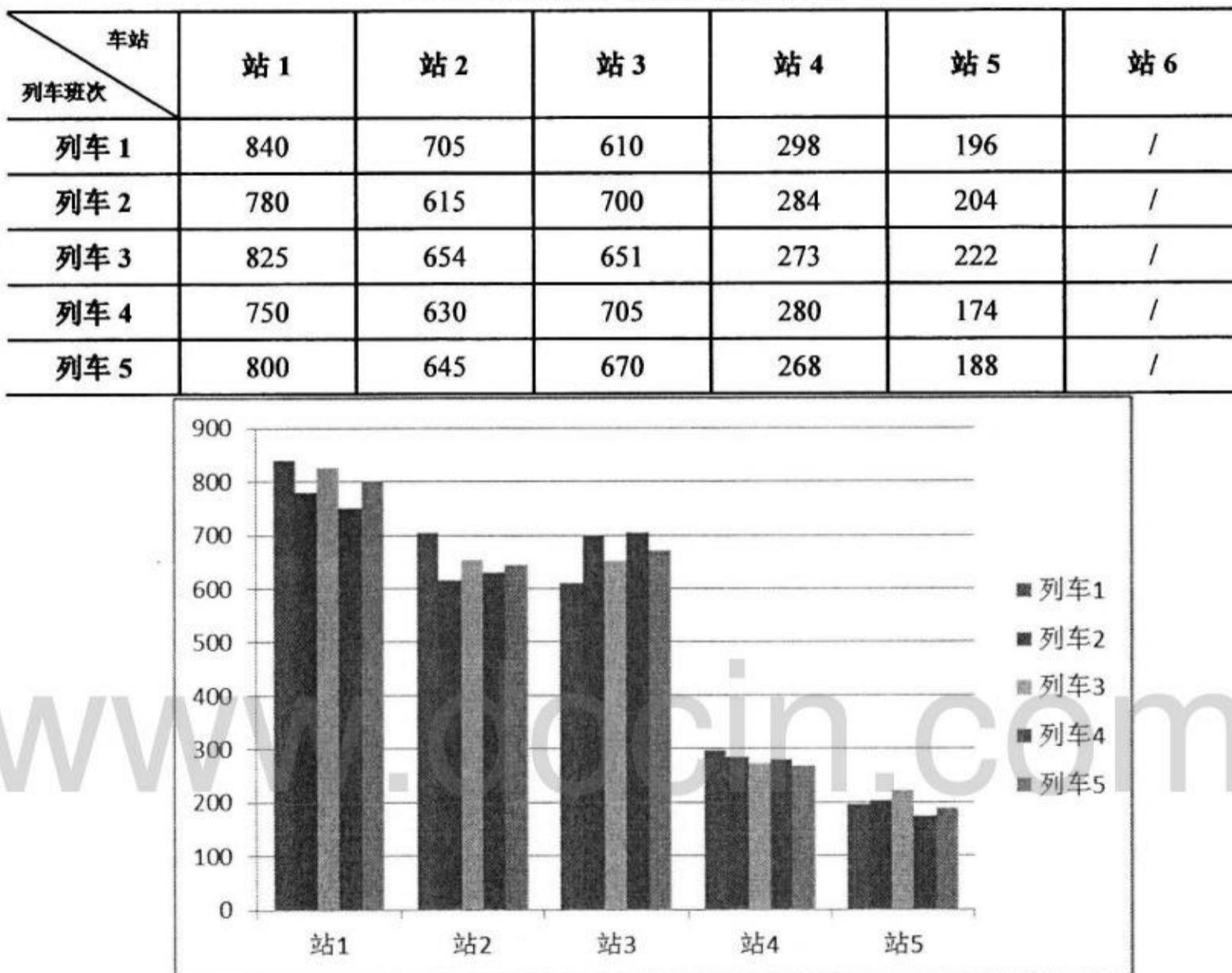


图 5-4 各班次列车在各站台上车人数

从图 5-4 可以看出，当列车抵达首站时，列车空载，因此，首站候车的乘客都能够上车。随着列车的开行，列车的实时载客量出现差异，因此各班次列车在后续各站台的上车人数会有不同。而对于特定的车站，每班次列车的上车人数具有相似性，这也从侧面说明了同一个统计时段内进站客流量具有相似性。

### 2) 各班次列车在各站台下车人数

某班次列车在某车站下车的人数由车上乘客的 OD 分配比例确定。列车在该站之前的各个车站的上车人数不同，同时，这些乘客的 OD 分配比例也不同，因此乘客在该站下车人数不同。

各班次列车在各站的下车人数计算结果如表 5.5 和图 5-5 所示。

表 5.5 各班次列车在各站台下车人数

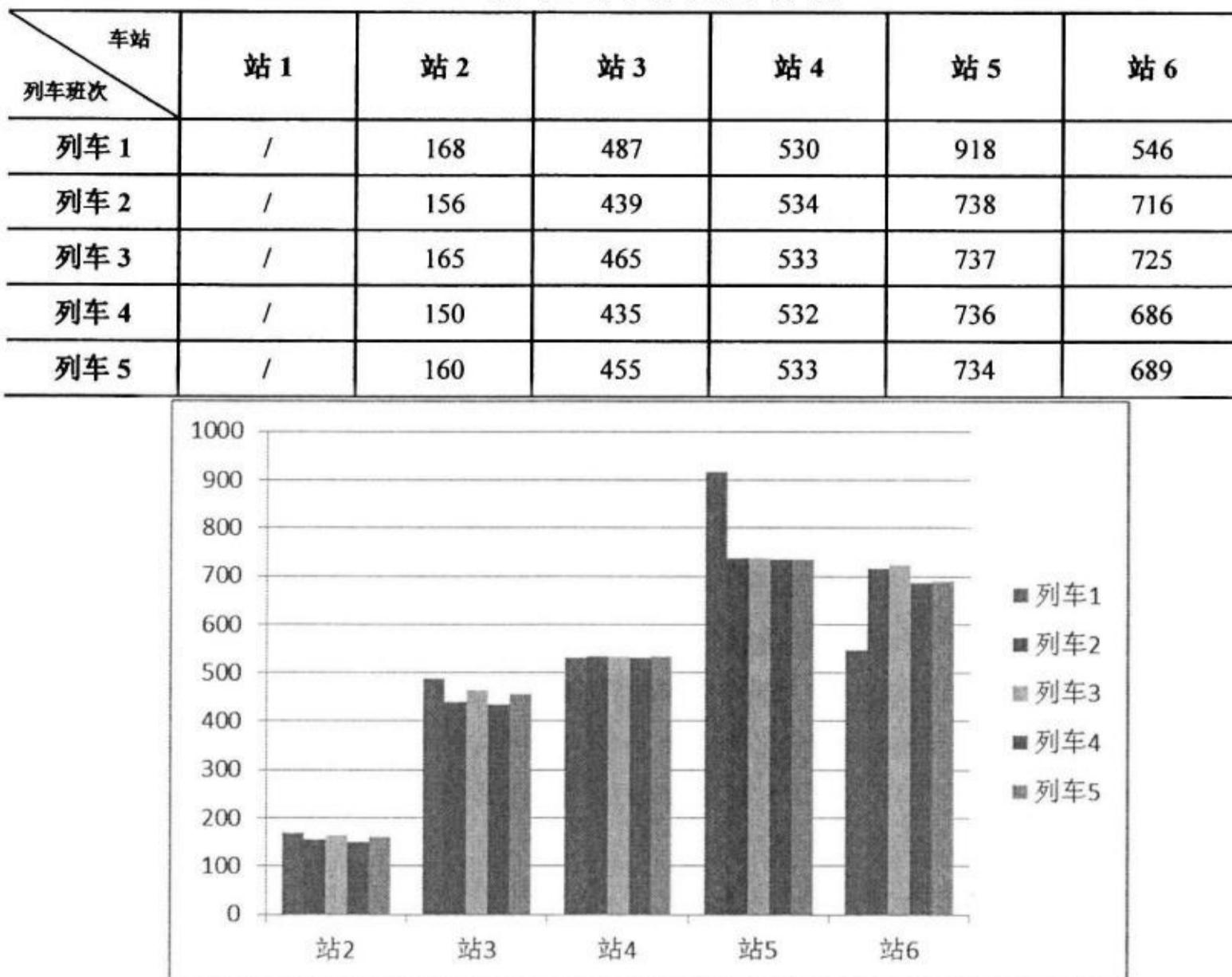


图 5-5 各班次列车在各站台下车人数

从图 5-5 可以看出，任一班次列车在某站的下车人数与其在之前车站的上车人数相关，以列车 1 的下车人数为例，结合图 5-4 和表 5.2 可知，其下车人数为所经各车站的上车人数与相应比例的乘积。

### 3) 各班次列车离开站台时各站台滞留人数

当各班次列车的实时剩余人数计算结果如表 5.6 和图 5-6 所示：

表 5.6 各班次列车离开站台时各站台滞留人数

车站 列车班次 \ 站	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6
列车 1	0	0	160	0	0	/
列车 2	0	0	69	0	0	/
列车 3	0	0	167	0	0	/
列车 4	0	0	155	0	0	/
列车 5	0	0	52	0	0	/

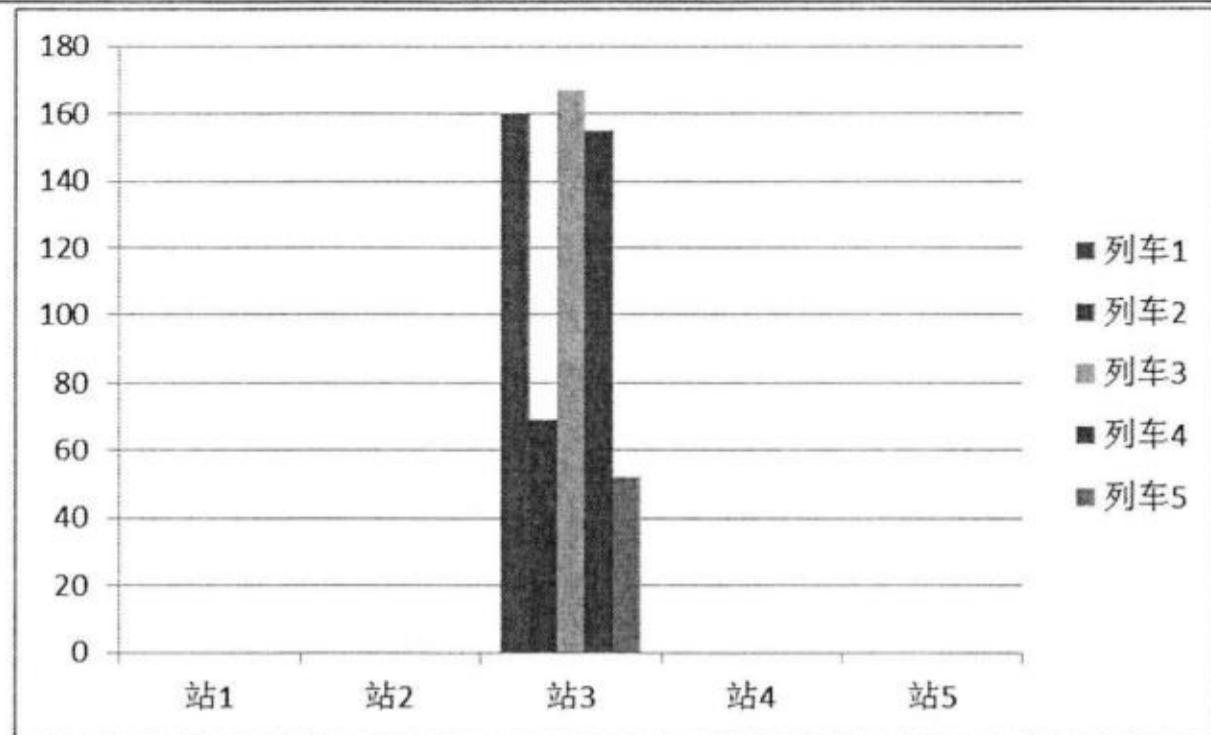


图 5-6 各班次列车离开站台时各站台滞留人数

从图 5-6 可以看出，各班次列车在站 1 和站 2 都没有乘客滞留，这是因为最初的几站时的上车乘客数量相比列车剩余载客量较小，候车乘客都能够上车，而站 3 出现了候车乘客滞留的情况，这是该站是换乘站，进站客流和换乘客流比较大，并且当时列车的剩余载客量不足以承载全部站台客流导致的。各个班次的列车到达后，站 3 的滞留人数出现了比较大的差异，这是由于原始输入数据中进站客流和换乘客流不稳定导致的。

#### 4) 各班次列车的实时断面流量

各班次列车的实时断面流量计算结果如表 5.7 和图 5-7 所示。

表 5.7 各班次列车的实时断面流量

断面 列车班次	S1	S2	S3	S4	S5
列车 1	840	1377	1500	1268	546
列车 2	780	1239	1500	1250	716
列车 3	825	1311	1500	1240	725
列车 4	750	1230	1500	1248	686
列车 5	800	1285	1500	1235	689

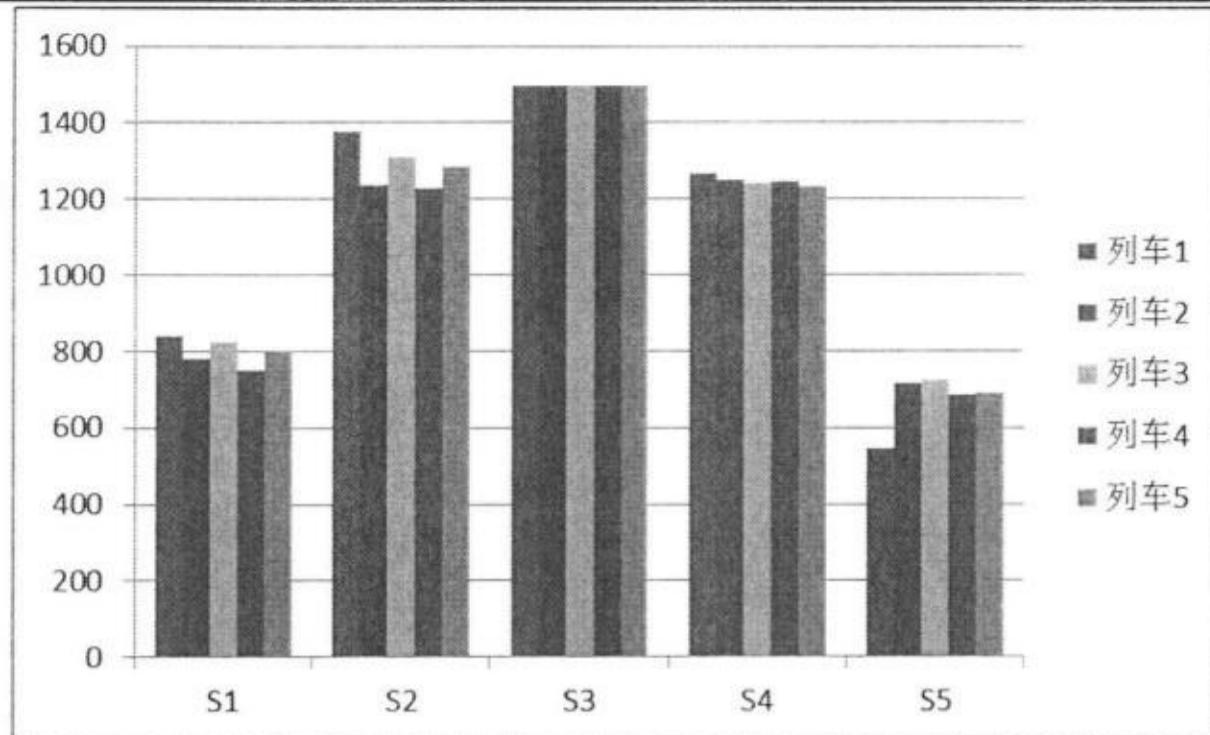


图 5-7 各班次列车的实时断面流量

由图 5-7 可以看出，各班次列车均在 S3 断面达到断面客流的最大值 1500，这表示列车在离开站 3 之后处于满载的状态，站 3 的站台上还滞留有乘客没有上车。该图与图 5-6 的结果是吻合的。

各断面的任一统计时段的断面流量为各班次列车的区间载客量之和，如 15 分钟断面流量分别为 S1—3995 人，S2—6442 人，S3—7500 人，S4—6241 人，S5—3362 人。

### 5.3 本章小结

本章在既有的“基于列车一站台交互的预测模型”算法基础上加以改进，构建基于换乘的轨道交通实时断面客流估计模型，并设计了案例证明了算法的有效性。具体工作和结论如下：

- 1) 提出了无障碍换乘条件下城市轨道交通的实时断面客流估计模型，既考虑进站客流又考虑换乘客流对断面客流的影响，使模型更加符合具有实用性。站台客流由前一时段的站台滞留客流以及当前时段的进站到达客流（如果该车站为换乘站的话，则另外有换乘到达客流）组成。本模型认为每趟列车到达站台时，站台上的乘客按照“先到先上车”的次序上车，并且每趟列车能够载走站台上的前一时段的滞留客流。另外，本模型认为换乘站的站台客流在上车时，根据当前时段站台上进站到达客流与换乘到达客流的比例混合上车。
- 2) 对模型的算法流程进行了描述，计算方法是对每个班次的列车进行实时追踪，依次得到各班次列车在各个车站的上、下车人数以及列车在各区间断面的实际载客量和满载率。并且设计了具体的案例进行计算，证明了模型和算法的有效性和可行性。

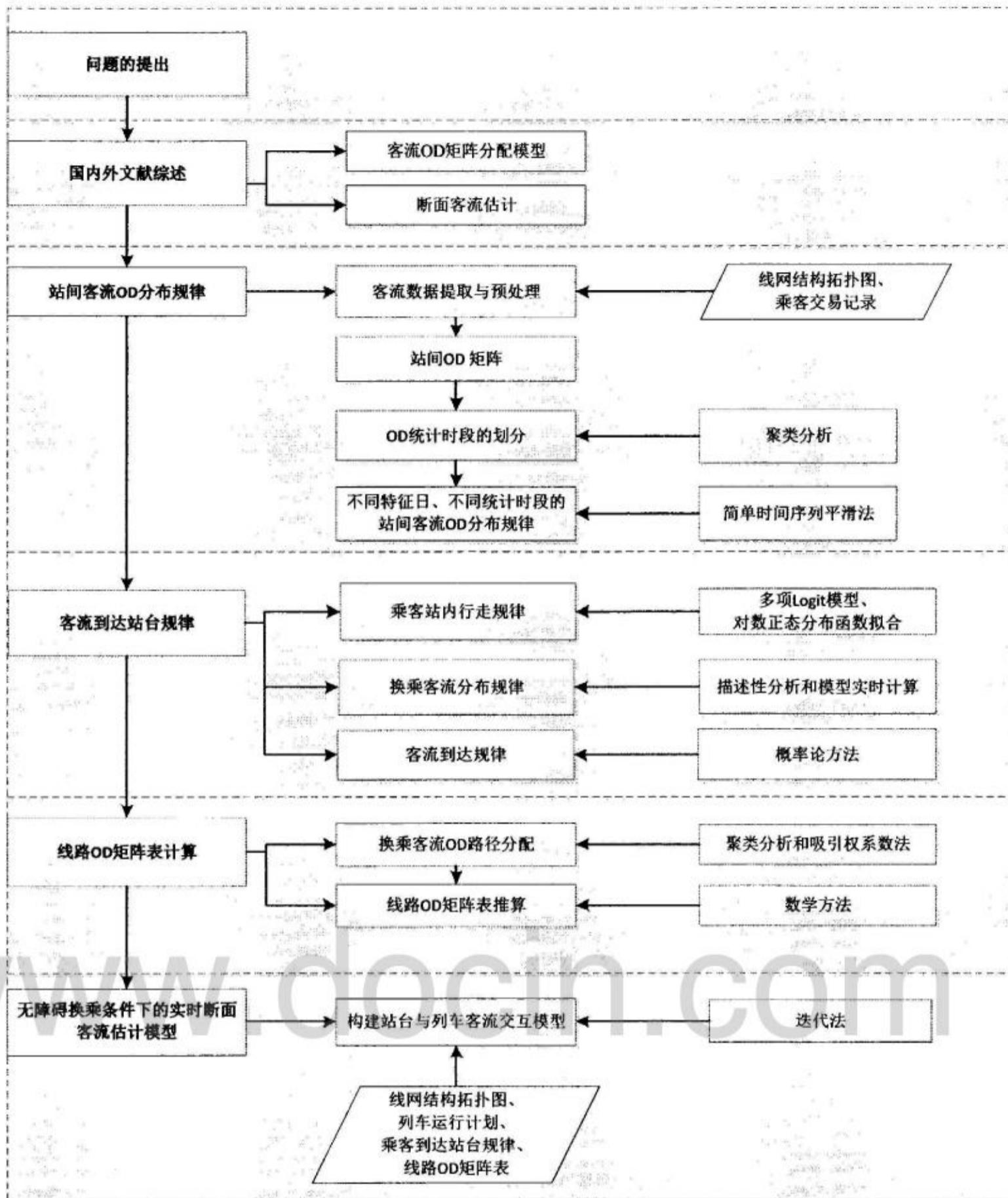


图 1-1 论文技术路线图

此页不缺內容

[www.docin.com](http://www.docin.com)

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本文以无障碍换乘条件下的城市轨道交通线网为研究对象，提出了断面客流实时估计模型。通过统计进站客流和换乘客流，并考虑乘客在站内的行走时间规律，建立了站台实时到达人数计算模型，并通过挖掘轨道交通历史 OD 数据推算列车在各个站台的下车人数，最后在此基础上建立了基于换乘的轨道交通实时断面客流估计模型。本文完成的主要工作如下：

(1) 研究了线网 OD 分布规律。首先介绍了轨道交通 AFC 系统中乘客交易信息的数据采集方法、数据提取和数据预处理的方法，在此基础上提取了轨道交通客流线网 OD 矩阵。接着将某特征日的全日客流分成 37 个时间段，运用聚类分析方法，得出具有相似 OD 规律的时间段，确定了各特征日合理的统计时段。最后，采用简单时间序列预测方法，确定各统计时段内站间客流的 OD 分布规律。

(2) 研究了客流到达站台的规律。结合乘客进站乘车和换乘的过程，可知站台实时到达人数计算方法的关键因素是实时进站乘客人数、实时换乘客流到达人数和乘客站内行走分布规律。首先指出进站客流可以通过 AFC 系统直接得出，而换乘客流实时到达人数无法通过 AFC 系统获得，需要计算得出。接着对乘客站内行走规律的影响因素和站内客流特性进行分析，通过实地采集乘客站内行走的数据，运用多项 Logit 模型计算该车站每条路径被乘客选择的概率，然后针对每条路径通过拟合对数正态分布函数，得出乘客站内行走时间的分布函数。然后对换乘客流的到达规律进行分析，指出换乘客流量可以运用本文即将建立的实时断面客流估计模型进行计算。最后，结合进站客流实时统计、换乘客流分布规律和乘客站内行走规律，利用概率论方法推演进站客流和换乘客流到达站台的规律，即站台的实时候车人数。

(3) 研究了换乘客流 OD 路径的分配方法和线路 OD 分布概率表的推算方法。首先以 OD 可选路径的基准通行时间为分类的依据，对乘客在该 OD 对上的实际通行时间进行聚类分析，辅以吸引权系数法对基准通行时间不可区分的路径进行再处理，最终得出乘客选择每条 OD 可选路径的概率，从而确定换乘客流的 OD 路径。接着，运用换乘客流的 OD 路径分配结果，结合客流线网 OD 分布矩阵表，提出了线路 OD 矩阵概率表的推算方法。

(4) 提出了无障碍换乘条件下轨道交通线网的实时断面客流估计模型。本文在既有的“基于列车一站台交互的预测模型”算法基础上加以改进，考虑换乘客流对断面客流的影响，通过计算统计时段内到达站台乘客在各班次列车上的分配关系以及在各站台的下车比例来估计断面客流。最后设计案例，证明了算法是可行的。

### 6.2 展望

在进行轨道交通实时断面客流估计时需要考虑的因素众多，由于本人精力和水平有限，还有许多问题需要进一步进行研究，主要包括：

(1) 在进行换乘客流 OD 路径分配的过程中，基准通行时间的计算是关键。基准通行时间的准

确性关系到该路径与其它路径可区分，进而关系到该路径应使用聚类分析还是吸引权系数法进行客流分配。本文通过累加 OD 可选路径的各原子路径的平均通行时间，加权进出站时间和换乘时间（本文实际计算时用原子路径的进站时间抵消换乘时间）得出该路径的基准通行时间。但是根据本文对乘客在站内行走规律的分析，乘客在换乘站耗费的时间可能是不同的，这受到乘客交通微观特性、各车站站厅的具体环境、当前时段的拥挤程度等多种因素的影响。因此，如何更合理地计算路径基准通行时间有待进一步研究。

(2) 在进行轨道交通线路断面客流估计的过程中，本模型认为换乘车站站台上的进站客流与换乘客流是按照当时站台上候车的人数比例上车的。这比较符合现实生活中各站台排队候车的情况，但是当某个时段站台上候车人数很少时就会出现计算误差。站台上的进站客流与换乘客流的上车比例，影响着列车所载乘客的在各个车站的下车比例，因此会对轨道交通的断面客流量产生重要影响。因此，如何确定站台上的进站客流和换乘客流的上车比例还需要进一步的研究。

(3) 本文提出的轨道交通断面客流估计方法具有一定的可行性，但是由于个人精力与计算设备条件所限，并未对算法的精度进行验证，在以后的研究中需要对模型算法的精确度进行详细的分析。

## 第二章 城市轨道交通客流线网 OD 分布规律分析

根据断面客流的定义，断面客流指的是在统计时段内线路上任一区间断面上通过的乘客数量。而断面上通过的乘客数量，可以通过该断面的所有列车的实时载客量与这些乘客的 OD 矩阵推算出来。可见，断面客流与该统计时段内的线网 OD 矩阵息息相关。

那么，以何种时间间隔对线网 OD 矩阵进行统计，将会对断面客流估计的精度产生影响。划分的统计时段越大，则不能准确反映客流的 OD 变化特征，误差越大；而划分的统计时段越小，则个体差别性表露越明显，误差也越大。研究表明，全天乘客出行的站间 OD 分布具有较大的规律性，因此可以将一年中的日子归为三类特征日，包括工作日、双休日和特殊节假日<sup>[28]</sup>。而在各类特征日中，各个时段的 OD 矩阵分布规律可以通过对各特征日中划分成若干时段分别提取 OD 信息，将 OD 分布规律相似的时段合并在一起，从而得出各特征日的合理统计时段。在这些时段内，OD 分布的变化比较小，呈现一定的稳定性。

本章研究的主要目的是确定各特征日对 OD 分布矩阵统计的合理统计时段，并得出各合理统计时段中的 OD 分布矩阵。

### 2.1 客流数据提取与预处理

#### 2.1.1 数据采集方法

本文使用南京市城市轨道交通自动售检票系统（Automatic Fare Collection, AFC）采集的完整原始交易记录作为基础数据。南京地铁现有 1 号线、2 号线、10 号线、S1 线和 S8 线共计 5 条运营线路，其中包括 5 个换乘站。图 2-1 为南京地铁运营示意图。



图 2-1 南京地铁运营示意图

在城轨系统中，AFC 系统以其高度的智能化设计，扮演着售票员、检票员、会计、统计、审计等角色，解决了轨道交通系统工作人员的重复繁琐工作，以数据自动收集和控制功能实现了票务管理的高度自动化。与传统的数据采集方法相比，由于 AFC 系统完整记录了所辖线网内每一位乘客的进出站时间、地点等车票交易信息，为挖掘乘客信息数据、探索客流演变规律、确定精确清分算法等提供了数据基础与技术支持。自动售检票系统（AFC）通过电子车票与读写器记录了乘客通过轨道交通出行的完整交易信息。乘客在通过进站闸机时，读写器记录了电子车票卡号、进站车站、进站时间、进站闸机号等信息；旅程结束后，在通过出站闸机时，读写器记录了电子车票卡号、进站车站、进站时间、出站车站、出站时间、出站闸机号、一卡通余额等信息。AFC 系统所采集的原始乘客交易信息记录如下表 2.1 所示：

表 2.1 AFC 系统原始乘客交易信息记录

进站线路号	出站车站编号	进站车站编号	票卡类型	交易子类型	进站时间	出站时间
1	7	26	54	2	15:39:43	11:33:42
10	4	4	56	2	12:37:15	16:33:14
1	6	9	56	2	19:48:54	17:57:44
10	4	17	56	2	7:34:20	8:34:53
2	21	21	56	2	10:49:23	7:44:17
1	5	62	56	2	13:57:28	10:12:35
1	5	54	56	2	14:42:07	9:13:56
10	4	17	56	2	14:57:07	14:57:07

### 2.1.2 数据提取

本文选取南京地铁全线网各车站自 S1 号线开通之后起的历史运营数据为基础数据，即 2014 年 7 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日一卡通和一票通基础交易信息。每条基础交易数据包括票卡类型、进站车站、进站时间、出站车站、出站时间。数据提取方法如下：

假设轨道交通线网共有  $n$  个车站，在时间段  $t_m$  内由  $i$  车站进站  $j$  车站出站的乘客数量记为  $S_{ij}^m$ ， $t_m$  时段内  $i$  车站进站的乘客总数为  $\sum_{j=1}^n S_{ij}^m$ 。因此在时间段  $t_m$  内由全线网进出站客流构成的一个  $n \times n$  维

OD 分布矩阵为：

$$S^m = \begin{Bmatrix} S_{11}^m & S_{12}^m & \cdots & S_{1j}^m & \cdots & S_{1n}^m \\ S_{21}^m & \cdots & \cdots & S_{2j}^m & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{i1}^m & S_{i2}^m & \cdots & S_{ij}^m & \cdots & S_{in}^m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1}^m & S_{n2}^m & \cdots & S_{nj}^m & \cdots & S_{nn}^m \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

式中，矩阵中的元素  $S_{ij}^m$  表示由  $i$  车站进站、 $j$  车站出站的客流人数。

### 2.1.3 数据预处理

在研究 OD 分布矩阵时，需要对 AFC 系统所采集的原始乘客交易信息记录进行整理和统计，得出 OD 矩阵表。这个过程，可以借助 Excel 等数据库软件。

在数据整理时发现，有些乘客交易记录的进站时间在轨道交通还未开始运营之前，此部分交易记录产生的原因可能是轨道交通车站工作人员进行工作等导致，因此在数据整理时需要剔除轨道交通运营时间之外产生的乘客交易记录。另外，一般说来，OD 矩阵的对角线上的数据表示了同站进出的客流，因此，数据量应该为零。通过整理发现原始数据中对角线上不为零，可能原因是乘客错误进站以及轨道交通车站工作人员进出车站进行工作等导致，因此在数据整理时需要对异常数据进