

## 摘 要

目前,许多城市为缓解交通状况,大力发展公共交通,同时已开展城市轨道交通修建或筹建工作。城市轨道交通具有快速、准时、运量大、无污染等优点,而常规公交具有线路设置灵活、方便等优点,两者都是城市公共交通体系的重要组成部分。有效结合城市轨道交通与常规公交的特点、扬长避短、实现有效协调,是提高城市公共交通体系整体效率的重要环节。

本文首先对国内外城市轨道交通与常规公交协调的研究和实践进行了总结。然后,对城市轨道交通和常规公交的技术、经济特性、功能定位等进行了分析比较,运用系统协调理论分析了城市轨道交通和常规公交协调的内涵、特征,在此基础上,提出了城市轨道交通与常规公交协调的协调模式,指出要从城市轨道交通站点协调和常规公交线网调整两阶段来实现城市轨道交通与常规公交协调。之后,对城市轨道交通换乘枢纽规划和轨道交通站间距的确定进行了研究探讨;在分析协调城市轨道交通的常规公交线网调整的必要性、目标、原则的基础上,根据城市公交客流 OD 矩阵,提出了相应的调整方法。最后,根据评价指标体系的构建原则,构建了城市轨道交通与常规公交协调的评价指标体系,并选用灰色关联度分析法进行综合评价。并以西安地铁一号线(初期)直接吸引范围内的常规公交为研究对象,对论文所提出的城市轨道交通与常规公交的协调理论与方法进行验证,判断其可行性。

关键词:城市轨道交通、常规公交、协调、评价

## Abstract

At present, many cities develop public transport to ease the traffic conditions, and have already started the construction of urban rail transit or preparing for construction. The advantages of urban rail transit are fast, on time, higher capacity, and pollution-free, while the advantages of conventional public transit are nimble wiring, convenient, etc., both of them are important components of urban public transport system. Improving the overall efficiency of the urban public transport system needs to unify urban rail transit and conventional public transit's characteristics effectively, enhance their advantages and avoid weaknesses, as well as coordinate them effectively.

This paper firstly summarizes the research and practice on the coordination between urban rail transit and conventional public transit. Then it analyzes and compares the technique and economy characters and the function locations of urban rail transit and conventional public transit. Analyses the connotation, characteristics of the coordination between urban rail transit and conventional public transit with the coordination theory. Based on the above, it gives coordination mode as two processes of urban rail transit site coordination and conventional public transit route net adjusting, and studies on the two subjects of urban rail transit transferring hub planning and urban rail transit station distance making. After that, based on the analysis of the necessity, the aim and the principle of conventional public transit route net adjusting, urban public traffic flow OD matrix, there gives the adjusting method. At last, based the principle of evaluation index system construction, the evaluation index system which evaluates the coordination between urban rail transit and conventional public transit is studied, and use grey correlation degree method to evaluate comprehensively. This paper takes the conventional public transit route net in the subway line 1 serving scope in Xi'an as an example, using the coordination theory and method mentioned in this text to evaluate its feasibility.

**Key words:** urban rail transit; conventional public transit; coordination; evaluation

## 论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：李金萍 2009年6月5日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：李金萍 2009年6月5日  
导师签名：李金萍 2009年6月5日

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

随着世界经济的持续发展和汽车的迅速普及,出现了全球范围的“交通危机”,交通堵塞和环境污染等“城市病”成为一个国际性的难题。在我国,国民经济的持续高速增长对交通产生了强大的需求,机动车拥有量急剧增加。而交通设施的相对匮乏、规划和管理水平的相对落后,同样使交通问题日益严重<sup>[1]</sup>。

世界上许多发达国家在提倡“小汽车进入家庭”之后,最终都在大城市实施“公交优先”的交通管理模式<sup>[2]</sup>。在我国国家标准《城市道路交通规划设计规范》中也已将公共交通明确列为优先发展事业。

在大城市,要改变交通拥挤的混杂状况,满足市民的出行需求,必由之路是发展城市轨道交通。东京、伦敦、纽约、芝加哥、莫斯科、柏林等城市的快速轨道系统都有几百到上千公里<sup>[2][3]</sup>。

在我国,自20世纪60年代末在北京建成第一条地铁以后,天津、上海、广州和深圳等城市相继建设了地铁。截止到2008年7月,中国内地目前已有北京、上海、广州等10个城市陆续修建地铁及轻轨线路并已投入运营,建成投入运营试运营的线路共有29条,运营及试运营里程共782.7公里,另外还有一条磁悬浮线路,全程31.17公里。根据建设2007年统计,我国城市轨道交通建设进入了一个新的阶段。一些经济实力较强的城市开始规划建设城市轨道交通。目前,在北京、上海、广州等12个城市中,有36条城市轨道交通线路正在建设,其中,以北京、上海、广州三个城市最多。此外,北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、南京、杭州、武汉、成都、哈尔滨、长春、沈阳、大连、西安、苏州等16个城市的城市轨道交通建设规划已得到批复。在未来10余年里,16个城市建设轨道交通线路总长约1700公里,总投资达到6200亿元。

据统计,目前国内40多座百万人口以上的特大城市中,已经有30多座城市开展了城市快速轨道的建设或建设前期工作,有10多个大城市上报城市轨道交通网规划方案,拟规划建设55条线路,长约1500公里,总投资5000亿元,其中“十一五”期间预计投资2000多亿元。我国已建、在建、筹建轨道交通项目的城市有几十个。随着拉动内需政策和城市化战略的实施,国内许多大城市都把发展城市轨道交通体系作为城市发展战略的重要组成成分。

然而,在我国已投入运营的地铁线路中,由于在地铁车站布局时没有充分考虑与其

他公交线路的换乘，造成地铁运营后车站周围交通混乱。在车站公交配套调整规划中，对新增线路考虑较多，对原有线路少有调整，从而使轨道与公共交通也存在不同程度的换乘难题。探其因是多方面的，但轨道交通与常规公交缺乏有效的协调是一个重要的方面。

造成以上情况的原因，首先是在城市轨道交通线网规划阶段，对轨道交通建成以后如何与常规公交进行配合与衔接考虑不够，造成换乘站规模不当，换乘效率不高；或站间距过短，轨道交通的快速优势无法充分发挥，减小了对乘客的吸引力。其次，在轨道交通线路建成以后，对于影响区常规公交线网的调整，缺乏成熟的理论和方法，使轨道交通客流无法快速、方便的集散，乘客感到换乘不便。

城市轨道交通效能的充分发挥有赖于其他交通方式，尤其是常规公交的配合与衔接。另外，轨道交通和常规公交作为城市公交系统中不同层次的两种方式，各自所承担的责任，所适合运送的出行距离都有所不同，合理的协调城市轨道交通和常规公交，可以使两者避免不良竞争，而做到扬长避短、优势互补。由此可见，科学合理的协调城市轨道交通和常规公交已成为一项重要而紧迫的工作。

在上述背景下，本文选题为城市轨道交通与常规公交的协调研究，旨在通过系统的方法，研究城市轨道交通与常规公交协调的状态和过程，分析影响城市轨道交通和常规公交协调的因素和规律，从而探寻城市轨道交通和常规公交协调的合理理论与方法。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

随着综合交通运输体系的发展，国外发达国家大城市内各种交通方式的多式联运、港站内各种运输设备的匹配与布置日益一体化，城市内部交通的衔接趋于成熟。在技术上，各种交通方式的集约要求逐渐淡化各自为政的行业领域观念；在管理上，不同部门之间的协调和谈判成为工作制度和管理的组成部分。

纽约城市公共交通各种方式（地铁、通勤铁路、轻轨、地面公交、轮渡等）均由纽约州交通局(New York Metropolitan Transportation Authority)统一管理，实现各种交通方式之间统一规划和管理。城市公共交通的这种管理体制便于组织各种交通方式之间的配合与衔接，提高整个城市交通系统的运输效率。

在汉堡，各种交通方式的衔接点均由高效换乘设施相连，其中交通换乘的实现主要在城市轨道交通站点的周围，如在公共交通联合会经过的地区，共有 188 个轨道交通车站。其中，有 150 个车站能换乘公交车；有 22 个车站已经形成主要的换乘枢纽，乘客可以

方便、安全、舒适地换乘；在其余的车站，公交车停靠在路边<sup>[4]</sup>。在 18 个公交站点，有 49 条公交线路安装了联动保证系统(ASS)，通过该系统，计算机发送信息给公交车驾驶员，指示是否在车站等待换乘乘客。通过这种手段，晚到的轨道交通车辆的乘客仍能赶上公交车。这种系统在晚间发车稀疏的时候就显得更加重要。

其它城市也非常重视不同交通方式之间的配合与衔接。伦敦重要的车站和地铁站几乎都建在同一栋站台之内，而且出站就有公共汽车或小汽车停车场；莫斯科的地铁换乘站则分为地铁与地铁、地铁与地面铁路、地铁与地面公交车站等多种类型。全市 600 多条公共汽车线路中，有 500 多条能与地铁连接。有的地铁站附近集中多达 20 条公共汽车、电车路线。此外，莫斯科换乘站建设时，还普遍做到了与地下行人过街通道相结合，一些公交车站就设在地下行人过街通道的入口旁边，缓解了路上车流与行人的矛盾，保障了交通安全与畅通，方便了乘客<sup>[5]</sup>。

国外对各种交通方式之间的衔接换乘研究较多，对公共交通的换乘研究多是基于概率统计基础，考虑存在换乘的交通方式和线路间的换乘等待时间，对车辆到达和开出时间进行优化。如 Hall(1995)提出了铁路与公共汽车间换乘的最佳安全极限公式；USUMTA(1983)和 Vuchicetal(1981)给出了换乘时间系统设计指南；Ablowitzetal(1987)在一换乘枢纽进行了各种调度策略模拟；LeeandSchonfeld(1992)对同步换乘区间的安全极限和发车间隔同时进行了优化；Shihetal(1997)开发了一种同步换乘区间的出行设计模型；Mgaed Dessuoky(1999)给出了在一定条件下通过一般的同步换乘区间模拟实施动态调度控制的方法<sup>[6]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

自 20 世纪 80 年代以来，随着我国国内许多大城市陆续开始轨道交通的规划、建设和运营，大城市的交通换乘与衔接日益引起了国内学者的重视，与此同时，城市轨道交通如何与常规公交进行有效的协调也已成为一项必须解决的现实问题。

1997 年底，上海高架快速道路在运营三年左右居然就出现了严重的拥堵现象。究其原因，除了由于上海市的轨道交通建设尚处于初始阶段以外，另一个重要的因素在于城市内部种交通方式的衔接不协调，城市综合交通体系的运行效率低。鉴于这种情况，市政府在《上海市城市交通白皮书》中，提出了上海市新的交通发展战略，即建成多式联运的综合交通系统，通过便捷的客运枢纽、紧凑的站台设置，为乘客创造方便的换乘条件；通过“停车—换乘”实现公共交通与个体交通的有效转换；通过综合性枢纽和连接市内的道路、轨道，将航空、港口、火车站和公路等对外交通设施与市内交通紧密相连；

通过物流中心,重新调配货物的流程,提高货运效率<sup>[7]</sup>。北京工业大学任福田教授等通过调查北京居民从居住地骑自行车再存车换乘公交出行,研究主要换乘点的自行车的存车量及骑车者的骑车时间,对北京城市自行车与公共交通的换乘进行了分析<sup>[8]</sup>;同济大学晏克非博士等通过研究广州市交通衔接状况及存在的问题,提出了广州市交通衔接改善方案,对改善的近期方案、中远期方案进行了编制<sup>[9]</sup>。

覃煌、晏克非在文献[10]中,探讨了轨道交通与常规公交的衔接关系,并提出其衔接规划布局的模式及其运行状态的评价指标<sup>[10]</sup>;姜帆在文献[11]中,从线路和车站相互关系的角度,分析和论述了在城市轨道交通规划中,该系统与其它交通衔接的方式及技术问题,并给出了国外在这方面比较好的做法<sup>[11]</sup>;袁振洲在文献[12]中,分析了国外典型城市的轨道交通换乘系统,并进行了轨道交通衔接换乘问题的研究<sup>[12]</sup>;覃煌、晏克非在文献[13]中,通过对多指标综合评价问题均一评价方法的局限性分析,提出了用数据包络分析方法进行轨道枢纽换乘效率评价的新思路,给出了换乘效率、输入冗余率和输出亏空率以及运行有效性的评价方法<sup>[13]</sup>;王秋平、李峰在文献[14]中,分析并推导出了从城市其他交通方式换乘轨道交通时在其车站的平均换乘时间计算公式,依此提出了其它交通方式换乘轨道交通并保持充分协调使其吸更多客流应采取的措施,以达到乘客换乘时间短,轨道交通运营效益高的目标<sup>[14]</sup>。孙俊在文献[15]中总结了轨道交通与其他交通方式无缝换乘布局形式,将轨道与常规公交的无缝衔接分为三个等级:综合枢纽站、大型接驳站、一般换乘站;对各等级枢纽内的布局、车流组织、人流组织都作了详细的分析<sup>[15]</sup>。王志臣在文献[16]中,在客流预测的基础上,对轨道交通与其他交通方式衔接的原则、模式、存在的问题进行了研究,在对轨道与常规公交的协调中,总结提出了换乘设施的四种衔接模式<sup>[16]</sup>。谢玉洁在文献[17]中探讨了机遇城市轨道交通的常规公交线路布局、一体化换乘布局以及票制协调等,提出了以轨道交通为主,常规公交为辅的“城市轨道交通与地面常规公交一体化”概念<sup>[17]</sup>。

在研究换乘和衔接的同时,也从不同的角度对城市轨道交通与常规公交在线网协调方面进行了研究。陆化普著的《城市轨道交通规划的研究与实践》一书中提到接运公交线网规划的关键环节是接运站点的选取和接运路线的优化<sup>[18]</sup>。接运站点以它可能为轨道交通线网接运的最大客运周转量来选取,而接运线路则以接运效率或接运乘客量最大为目标搜索优化。冯进峰、韩萍提出适应城市轨道交通建设的公交线网调整方法,这种方法首先利用预测得到的公交客流 OD 矩阵,将各交通区轨道交通线路直达运送的客流从公交 OD 矩阵中除去(它们不用常规公交接运),将轨道交通线路各站的非直达客流加到

该站所在区的 OD 矩阵中去,按照各区所标明的客流情况,确定公交线路的起讫点,再根据最短时间、最大客流量原则,重新生成公交网<sup>[19]</sup>。曹玫在文献[20]中介绍了一种轨道交通接运公交线网规划中出现的一种新模型方法——遗传算法,通过界定车站影响区并将其离散化编码,以运营者消耗和使用者消耗之和最小为公交线网优化目标函数,建立模型,最后使用遗传算法搜索最优接运公交线路<sup>[20]</sup>;范海雁等人在文献[21]中从公交站点,公交线路及公交线网等三方面研究了以轨道交通为中心的常规公交线网的调整问题。在公交调整原则的基础上给出了基于轨道交通的公交线网调整流程<sup>[21]</sup>。

总的来说,国内对城市轨道交通与常规公交协调的研究尚处于起步阶段,基础资料还很缺乏。在我国城市化进程快速发展的今天,研究城市公共交通协调中所存在的问题,探讨怎样解决这些问题亟待进行。

### 1.3 研究的目的和意义

城市轨道交通与常规公交的协调,就是研究如何通过一系列的协调、规划手段,使两种交通线网达到紧密联结、互补短长,使换乘枢纽方便出行人员的换乘,为构建一体化的城市公共交通系统打下基础。最终目的则是提高城市公共交通系统的整体运行效率,增强其在城市交通中的竞争力。

本文研究的意义主要有以下四点:

#### (1) 实现优先发展公共交通战略的需要

居民选择出行交通方式时,需要考虑方便、快捷、经济、舒适、安全等各种因素。要引导城市交通结构向公共交通方向发展,就要使公共交通在居民所要考虑的因素上优于其它交通方式。实现高水平的公共交通服务就要求将这两种公交方式整合起来,发扬各自的长处、弥补彼此的不足。

#### (2) 是城市交通可持续发展的需要

目前我国正处于城市化加速发展阶段,城市用地规模迅速扩张,城市人口急剧增长,由此所带来的交通问题愈演愈烈。对比以轨道交通为骨干的城市公共交通和小汽车交通对城市结构及形态的影响,轨道交通与常规公交相协调以提高公共交通的服务水平、增强公交竞争实力是城市交通可持续发展的需要。

#### (3) 是城市轨道交通发展的需要

一方面,城市轨道交通准时、快速、运量大、能耗低、污染轻,符合城市交通可持续发展的原则,是大城市公共交通的发展方向。另一方面,轨道交通又是一项投资巨大

的系统工程。城市轨道交通要真正体现大容量快速交通运输的优势就必须有相当的客流量，必须与其他客运交通工具进行良好的衔接，特别是与常规公共交通的衔接，才能充分发挥其作为公共交通骨干的作用，保证有足够的客源维持良好的经济效益，促进城市轨道交通的良性发展。

#### (4) 是优化调整城市布局的需要

城市交通是构成城市功能的基本要素，是城市存在和发展的基础。交通可达性是影响城市空间布局的重要因素。不同的交通方式形成各具特色的区位可达性分布，对应着一定的城市空间分布形态。发展城市轨道交通，并通过轨道交通与常规公交的协调，提高城市可达性，使城市能够以带状向近、远郊区延伸，形成新的围绕交通站点而建立的新市镇，并把大城市联系起来，诱导城市人口和就业岗位的重新分布，从而优化城市空间格局。

### 1.4 本文主要研究内容与思路

本文在交通一体化前提下，分析了城市轨道交通与常规公交的不同特性，从站点和线网两方面对城市轨道交通与常规公交进行协调分析，采取理论与实证分析相结合的方法，对城市轨道交通与常规公交的协调提供科学的理论依据及有效的解决途径。

论文由六部分组成，相互之间存在各种有机的关系，各部分的内容在叙述和结构上有着相互承接的关系，具体技术路线见图 1.1。

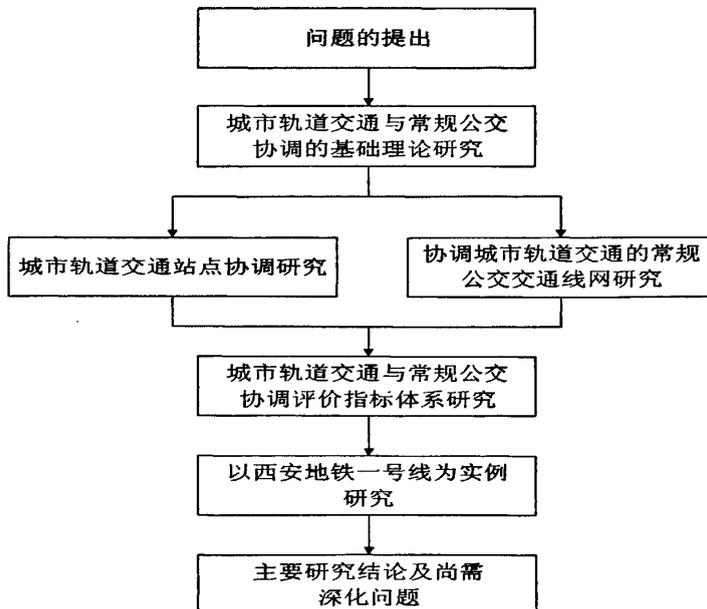


图 1.1 研究思路框架图

各章具体内容如下：

第一章 绪论

第二章 分析城市轨道交通与常规公交的技术、经济特征、功能定位，以及协调的外部影响因素，探讨城市轨道交通与常规公交线网协调的内涵与特征。

第三章 在分析轨道交通站间距影响因素的基础上，以建设运营成本和时间作为主要参数，建立优化轨道交通站间距的模型，研究探讨城市轨道交通与常规公交换乘枢纽布局协调方法。

第四章 在已知城市公交 OD 矩阵的条件下，用 Logit 模型得出轨道交通方式和常规公交方式的划分率，得出轨道交通和常规公交的客流 OD 矩阵，然后，通过交通分配，把交通流分配到各个路段，再结合公交线网调整原则对轨道交通影响区域内的常规公交线网进行优化。

第五章 基于构建城市轨道交通与常规公交协调评价体系原则，研究建立城市轨道交通与常规公交协调的评价体系。

第六章 以西安市地铁一号线为例进行实例论证。

第七章 在总结本文主要研究结论之后，提出本研究中还有待于进一步深化的若干问题。

## 第二章 城市轨道交通与常规公交协调分析的基础理论

### 2.1 两种交通方式的特性与功能定位分析

在进行城市轨道交通与常规公交协调研究时，将包含轨道交通和常规公交的城市公共交通体系，作为一个完整的系统进行分析。由系统论可知，结构是系统保持整体性并具有一定功能的内在依据，亦是系统内部各组成要素之间相对稳定的联系方式、组织秩序及其时空关系的内在表现形式。同时结构反映了系统的各个要素是如何联系为整体的，它反映了系统的有序特征<sup>[22]</sup>。为了有效的剖析城市轨道交通和常规公交之间相对稳定的联系方式、组织秩序及其时空关系的内在表现形式和整体的有序性特征，有必要对这两种公交方式的技术、经济特性及其功能定位进行分析研究。

#### 2.1.1 技术、经济特性比较

##### (1) 技术特性

城市轨道交通与常规公交技术特性的比较见表 2.1。

表 2.1 城市快速轨道交通与常规公交技术特性的比较<sup>[23]</sup>

系统特性	城市快速轨道交通			常规公交		
优缺点	投资巨大，提供全天候高质量服务，无交通阻塞			线路设置、投资方面非常灵活		
路权形式	地面	高架	地下	混行	专用线	隔离线
车辆容量（人/车）	300~375	300~375	300	80~120	80~120	120
路线客运量（千人/h）	50	70	70	10~15	15~20	30
旅行速度（km/h）	15~35	30~35	30~35	10~12	15~18	15~30
总成本（包括利息） （美元/人公里）	0.10~ 0.15	0.12~ 0.20	0.15~ 0.25	0.12~ 0.24	0.02~ 0.10	0.02~ 0.05

由表 2.1 可知，轨道交通在车辆容量、路线客运量及旅行速度方面都要明显优于常规公交。在路权方面，轨道交通可运行于地面、高架和地下，特点是专用路权，无交通阻塞，运行准点而且安全性高。常规公交可与其它地面交通混合行驶，也可以专用线、隔离线的形式分离行驶，线路设置灵活，但专用线和隔离线要占用宝贵的地面道路空间。在总成本方面，轨道交通则是处于不利的地位，轨道交通的总成本一般高于常规公交。

##### (2) 经济特性

轨道交通的经济效益包括两方面：轨道交通自身建设所带来的效益和轨道交通的功能所带来的效益。把城市轨道交通的主要效益分为轨道交通的效益和轨道交通受益者的效益两方面分析，见表 2.2。

表 2.2 轨道交通的经济效益及受益者<sup>[23]</sup>

		百分比 (100%)	
轨道交通的效益	节约乘客时间		70
	舒适/方便		8
	增加乘客		8
	经营 (驾驶) 者	小汽车	7
		公共汽车	2
		小计	9
	其他		5
总计		100	
轨道交通的受益者	小汽车及其使用者	继续乘用小汽车者	16
		转乘轨道交通者	2
		小计	18
	公共交通乘客	继续乘用公共汽车者	29
		转乘轨道交通者	38
		小计	67
	增加的新乘客		8
	经营者	轨道交通经营者	3
		公共汽车经营者	6
		小计	9
其他		-2	
总计		100	

表中调查数据表明,轨道交通节约乘客时间占总效益的 70%,可以看出轨道交通显著的优势在于其快速性。轨道交通的最大受益者是原先使用公共汽车而现在使用轨道交通的一般乘客,其余的公共汽车乘客也因为公共汽车的压力减轻而获利,说明发展轨道交通有利于提高公共交通的服务水平和竞争能力,促进公共交通的发展。

### 2.1.2 轨道交通吸引范围的确定

轨道交通吸引范围是指轨道交通所吸引客流的全部区域范围。轨道交通吸引范围包括一次吸引范围和二次吸引范围,一次吸引范围也称直接吸引范围,是指轨道交通吸引的直接客流区域范围,是步行到轨道交通的客流分布范围,是轨道交通的合理步行区的范围。二次吸引范围也称间接吸引范围,是指通过非步行交通方式与轨道交通换乘的客流区域范围,是轨道交通的影响区范围。

轨道交通吸引范围的确定方法比较多,而且在实际工程中已经有运用,本文不再叙述。比较典型的实例就是北京市地铁五号线的客流预测过程中的轨道交通吸引范围的确定。在五号线两侧,取垂直距离 750m 划出一次吸引范围,垂直距离 3km 划出二次吸引

范围，如图 2.1 所示，图中  $M_1$  为一次吸引范围， $M_2$  为二次吸引范围<sup>[24]</sup>。

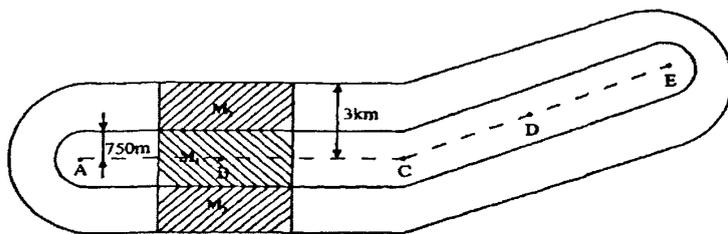


图 2.1 轨道交通吸引范围示意图

### 2.1.3 功能定位

城市客运需求的多样性，客观上要求城市公共交通系统能够提供多元化的服务，而不同的交通方式因特定的技术、经济特性，只能适应一定的需求。因此，既要发挥各种交通方式的优势、特点，又要使其相互补充、分工合作，发挥系统的整体功能。轨道交通与常规公交综合特征的比较如表 2.3 所示。

表 2.3 轨道交通与常规公交综合特征比较<sup>[26]</sup>

	综合特征	轻轨	公共汽车	通勤铁路	地铁
系统成本	建设成本	中	低/中	低-高	高
	运营和维修成本	中	高	高	低
技术因子	可靠性	优	中	良	优
	道路隔离	灵活	较少	较多	100%
	自动化运行	不	不	不	是
	列车编组	多	不	多	多
公众印象	舒适、乘车质量	良	中	好	优
	线路识别	易	难	易	易
	社会可接受性	高	低	高	高(新线)、低(旧线)
线路兼容能力	货运协调	也许	不	也许	不

通过分析比较上表中轨道交通与常规公交的综合特征可以得出，城市轨道交通与常规公交的关系应定位为主干与支流的关系，城市轨道交通是城市主要客流走廊，主要以承担中远距离客流为主，以发挥其大运量、快速、准时、舒适的系统特征。常规公交运量小，但机动灵活，是解决中、短途交通的主力，其更多地应考虑网络覆盖范围，为短距离出行提供方便条件。

## 2.2 城市轨道交通与常规公交协调的内涵与特征

### 2.2.1 协调的外部影响因素分析

作为一个开放的系统而言，系统的外部影响因素对系统的正常运转和健康发展起着

不可忽视的作用。城市轨道交通与常规公交的协调也要受到众多外部因素的影响，如城市社会经济状况、城市空间结构及发展战略、城市土地利用、城市交通布局等<sup>[27]</sup>。

### (1) 城市社会经济状况

在影响城市客运交通的诸多因素中，城市经济是最为密切相关的因素之一。城市经济的繁荣发展，加快了城市化的进程，城市辐射力上升，带来人流、物流的大幅度上升，从而产生大量的交通需求。另外，经济基础也是交通设施能否付诸实施的前提，城市轨道交通与常规公交的布局形式、规模，都要考虑其在经济上的合理性和可行性。

### (2) 城市空间结构及发展战略

国内外城市交通建设和运营的经验表明：对于一种特定类型的城市空间结构布局，都有相应的交通线网空间结构与之相适应。通常交通组织比较成功的城市，其交通线网的空间结构与城市的空间形态结构都结合得比较成功，如德国汉堡、莫斯科等。因此研究和分析城市空间结构及发展战略的特点，规划合理的城市轨道交通与常规公交协调体系，有利于城市中心区人口的疏散，减少城市中心区人口密度，加快城市副中心、边缘集团以及卫星城镇的建设，使城市空间结构趋于合理。

### (3) 城市土地利用

城市土地利用决定了城市不同社会经济活动在不同区域的集聚程度和分布特性，也决定了城市客运交通发生、吸引源的分布特性，对城市客运交通需求、客运交通网络布局具有决定性的影响。促进城市社会经济发展和满足客运需求的用地结构有利于客运交通系统的发展，而客运交通系统的发展也将促进用地结构的优化调整。

### (4) 城市交通布局

城市公交线网规划是城市综合交通规划的重要组成部分，是整个城市交通系统密不可分的组成要素之一。城市公交线网规划既要研究当前的交通现状，解决当前的交通问题，与当前的其它城市交通设施合理配合衔接，还需要考虑未来城市交通的发展趋势，未来其它交通设施规划和未来可能出现的交通问题<sup>[23]</sup>。

## 2.2.2 协调的内涵

### (1) 协调的概念<sup>[27][28][29]</sup>

协调是一个在学术研究和应用中都使用十分广泛的概念，但却没有一个十分明确的定义。它涉及的学科领域主要是系统学、控制论、经济学、管理学、并行计算及人工智能等，各自有不同的研究角度和目的。

系统协调的基本思想是，通过某种方法来组织和调控所研究的系统，寻求解决矛盾或冲突的方案，使系统从无序转换到有序，达到协同或和谐的状态。系统协调的目的就是减少系统的负效应，提高系统的整体输出功能和整体效应。系统协调的理论基础是自组织理论、协同学和控制论等。应用系统协调原理处理社会系统或人工系统时，往往需要同时采用软控制和硬控制原理，在组织和自组织以及硬控制和软控制之间寻找一种折衷和平衡。

协调除了作为一种调节手段，或一种管理和控制的职能之外，有时也作为一种状态表明各子系统或各系统因素之间、系统各功能之间、结构或目标之间的融合关系，从而描述系统整体效应如何。这种状态协调概念有时与和谐、协同等概念是密切联系在一起的。

## (2) 轨道交通与常规公交协调的涵义

轨道交通与常规公交协调主要包括两方面的协调：站点协调和线网协调。城市轨道交通与常规公交站点协调主要是使市内不同交通方式、不同交通线路进行相互衔接，构成交通枢纽系统。而交通衔接是通过交通枢纽来实现的，功能完善、级配合理、分布有序的交通枢纽是大城市综合交通系统必不可少的支柱。

城市轨道交通与常规公交线网协调就是通过有效的方法、手段，合理规划和调整轨道交通与常规公交线网，使两种公交线网在保证自身的合理性、与外部环境相适应的基础上，最大程度地消除彼此之间的矛盾，达到协同工作，最终提高城市公交系统的整体功效水平。城市轨道交通与常规公交线网协调系统构成如图 2.2 所示。

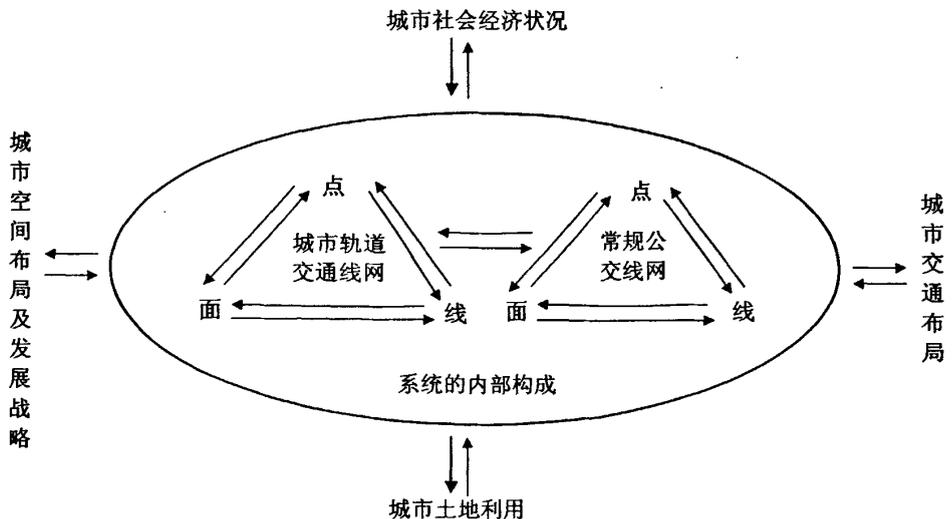


图 2.2 城市轨道交通与常规公交线网协调系统构成图

### 2.2.3 协调的特征

#### (1) 大系统性

城市轨道交通与常规公交的协调问题是一个大系统问题，同时还涉及到众多的外部影响因素，这些内、外部因素相互制约并相互影响，纷繁复杂，必须借助系统的方法进行解决。

#### (2) 层次性

整个协调系统包括两个子系统，两个子系统又都可以划分为点（站点协调）、线（线网协调）、面三个层次。

#### (3) 整体性

轨道交通和常规公交协调的实现是各个子系统功能得以实现的结果，轨道交通和常规公交协调目标的实现也是各子系统功能得以实现的前提，两个子系统协调的相互统一构成了系统的整体协调。

## 2.3 城市轨道交通与常规公交协调模式研究

由城市轨道交通与常规公交的技术、经济特征及功能定位分析可知，城市轨道交通与常规公交之间是一种主干与支流的关系。同时，城市轨道交通与常规公交之间也是一种“静”与“动”的关系。“静”体现为：城市轨道交通建设投资巨大、技术复杂，一旦建成难以或根本不可能进行改建、重建；“动”是指常规公交投资少，而且机动灵活，其运行线路可以随时调整<sup>[27]</sup>。

由于城市轨道交通与常规公交之间这种主干与支流、“静”与“动”的关系特征，在轨道交通线路已确定的情况下，轨道交通与常规公交协调主要有两个方面：即站点协调和线网协调。综合轨道交通和常规公交的各种特征和协调涵义，本文主要从两个方面进行研究：城市轨道交通站点协调研究和协调轨道交通的常规公交线网研究。

城市轨道交通的站点协调主要有两个方面：站间距和站点位置，本文主要研究站间距优化。常规公交线网调整是指，在轨道交通线路建成以后，优化调整其客流吸引范围内的常规公交线路。基本做法是：适当减少与轨道交通相平行的常规公交线路，增加或调整一些常规公交线路使其与轨道交通线路垂直、交叉，并使轨道交通附近的常规公交站点与轨道交通站点重合，以方便乘客换乘。这样，一方面使常规公交能够适应新的市场，与轨道交通按各自的功能定位有效的分担城市公交客流；另一方面使常规公交避免与轨道交通争夺客流的同时，又能为轨道交通接运充分的换乘客流。

城市轨道交通与常规公交的协调最终要体现在“点、线、面”三个层次上。在“点”上，要求换乘方便、衔接紧密；在“线”上，要求分工明确、相辅相承；在“面”上，要求层次清晰，与城市发展协调一致。“点、线、面”三个层次的协调才是全部工作的理想结果。

## 2.4 小结

本章对城市轨道交通和常规公交的技术、经济特征及其功能定位进行了分析。阐述了城市轨道交通与常规公交协调的外部影响因素、内涵与特征。对城市轨道交通和常规公交协调的目标和模式进行了研究。

## 第三章 城市轨道交通站点协调研究

城市轨道交通站点协调研究,需注重两项研究工作,一是轨道交通换乘枢纽的规划,一是能够与常规公交相协调的轨道交通站间距的确定。本章首先对轨道交通换乘枢纽规划进行简单的系统性分析,然后基于轨道建设运营成本和出行时间,研究能够体现轨道交通与常规公交协调相处的轨道交通站间距确定方法。

### 3.1 城市轨道交通换乘枢纽研究

#### 3.1.1 轨道交通换乘枢纽的概念

“枢纽”用于比喻冲要处或事物的关键所在,“换乘”就是人员转换运输工具的行动。轨道交通是城市和城市交通的一部分,不仅两线以上的车站构成是城市轨道交通系统的换乘车站或换乘枢纽,一条线路的首末或中间站也可以视为交通换乘枢纽。

城市轨道交通与常规公交的线网衔接与客流交换最终都要通过换乘枢纽来进行。合理的轨道交通换乘枢纽规划不但直接关系轨道交通的吸引力,影响轨道交通系统的服务水平,也是整个城市公交系统高效运转的关键因素之一。

#### 3.1.2 轨道交通换乘枢纽规划的目标与原则

##### (1) 轨道交通换乘枢纽规划的目标

轨道交通换乘枢纽规划应以城市客运交通的目的——实现人的移动为最终优化目标,以较少的资源(包括土地)和能源消耗,较低限度的环境影响,利用交通效益较好的交通工具实现交通系统的安全、舒适和便捷的优化组合。具体来说,应达到以下目标<sup>[27][43]</sup>。

①从宏观角度把握城市公共交通客运供需体系,使其供需平衡、层次分明、各要素搭配得当,系统运行通畅;

②以有效的客运交通方式组合实现城市道路网运送客流的最大化;

③指导轨道交通站点周围土地规划,使建筑发展与交通发展协调一致;

④在客运供需体系和宏观规划的基础上,研究地面交通和轨道交通的衔接规模和衔接布局,为设计工作提供详细的规划条件;

⑤提出具体规划方案,建立以轨道交通为骨干,常规公交为主体,中小巴、出租车为补充,相互配合,共同发展的城市公共交通客运体系,以满足城市现代化运输需求;

⑥通过对地面交通与轨道交通的衔接体系进行层次分析,从而确定公交体系优化城

市内部公共交通线路、枢纽和站点布置；

⑦根据交通衔接点的交通量，规划为不同等级、不同规模的客运枢纽，发挥各种交通集聚效应，加强系统化之间的有效衔接，以扩大轨道交通系统服务范围，提高公交整体运输能力。

⑧提供良好的换乘空间和设施，通过对站点综合规划设计，合理组织换乘客流和集散人流的空间转移，达到系统衔接的整体化。

## (2) 轨道交通换乘枢纽规划的原则

轨道交通换乘枢纽规划的原则应体现城市公共交通发展的整体性、协调性、便捷性、合理性和政策性，使常规公交与轨道交通能有机的形成一体，发挥网络的运输能力。轨道交通换乘枢纽规划原则主要有<sup>[27]</sup>：

- (1) 整体分析和局部分析相结合的原则
- (2) 换乘枢纽布局和城市土地利用规划紧密结合的原则
- (3) 换乘枢纽的布置与区域综合交通环境相结合的原则
- (4) 衔接点等级和规模的确定原则
- (5) 换乘中心设置原则
- (6) 公交优先的原则

### 3.1.3 轨道交通换乘枢纽等级的确定

良好的城市交通方式间的换乘设计，可使不同交通方式与设施相互衔接、融入一个统一的城市交通体系。使其在各自的优势范围内发挥特长，并相互补充、相互促进、共同发展，实现城市客运系统高效运转。随着我国城市轨道交通网络的逐渐形成，轨道交通的换乘是否方便对轨道交通系统效率的影响越来越明显。合理等级的划分，是城市公交换乘枢纽实现优化设计的前提。

上海、深圳、北京等城市进行以轨道交通为主的客运枢纽分级时主要根据交通方式种类、相衔接的轨道交通线路数或枢纽所在区域的土地开发类型等指标将轨道交通枢纽分为3个级别，见表3.1。

表 3.1 我国部分城市轨道交通枢纽分级

城市	分级指标	枢纽分级	枢纽特征
上海	衔接的轨道交通线路数	大型换乘枢纽	三条市区级或两条市域级线路衔接的节点
		换乘车站	两条市区级线路衔接的节点
		一般车站	其他轨道交通车站
深圳	衔接的交通方式种类、枢纽所在区域的土地开发类型	综合换乘枢纽	位于大型常规公交及对外交通枢纽的衔接处或对外口岸、城市主次中心的轨道交通枢纽
		大型换乘枢纽	位于常规公交枢纽衔接处或片区中心的轨道交通枢纽
		一般换乘枢纽	与常规公交站点衔接的轨道交通车站
北京	衔接的交通方式种类、衔接的轨道交通线路数	一级枢纽	与大型对外交通枢纽衔接的轨道交通枢纽
		二级枢纽	轨道交通线路之间的换乘枢纽以及轨道交通与多条常规地面公交线路衔接的换乘枢纽
		三级枢纽	与成规公交站点衔接的轨道交通车站

经过人们认识的深入以及对各城市实施效果的总结,目前认为只将衔接的轨道交通线路数,或衔接的轨道交通线路数再加衔接的交通方式种类作为轨道交通换乘枢纽的分级指标都是不合理的。在广州市轨道交通线网规划和西安市轨道交通线网规划中,专家们一致认为,正确的分级应该综合考虑枢纽所衔接的交通方式种类,衔接的轨道交通线路条数,以及枢纽所在区域的土地开发类型等多种因素,各等级轨道交通换乘枢纽的特征如下<sup>[27][30]</sup>:

### (1) 综合枢纽站

综合枢纽站一般位于多种交通方式汇集的客运中心。公交线路一般呈放射形布置,可以多达十几条,站场规模一般在 10000m<sup>2</sup> 以上。城市中的综合枢纽站一般不仅限于城市轨道交通和城市常规地面公交,有时还包括长途汽车、地面铁路、水运设施等。具有客流集中、换乘量大、辐射面广等特点。

### (2) 大型接驳站

大型接驳站是指位于轨道交通首末站、地区中心及换乘量较大的车站的换乘点,在此布置的地面常规公共交通线路主要为某一个扇面方向的地区提供服务。公交车站可采用总站或规模较大的中途站两种型式。总站的规模一般在 3000~5000m<sup>2</sup>,中途站需提供 3~4 个车位或线外有超车功能的港湾式停靠设施。

### (3) 一般换乘站

一般换乘站是轨道交通的一般中间站与地面常规公共交通线路的中间站的换乘点,其一般位于土地紧张的市区。

### 3.2 轨道交通站间距的优化

轨道交通与常规公交通过站点进行客流转换相互衔接。因此，站点是轨道交通及常规公交规划的重要环节。车站间距是公共交通线网在规划及线路设计时要考虑的重要因素之一，站间距离过短会降低运营速度、增加能耗及配车数量，多设车站也增加了工程投资。站间距离过大又会给乘客到站及离站带来不便并增大车站负荷。车站间距影响出行时间和需求量，通过轨道交通站间距的合理设置与组合，可以达到充分发挥二者优势的目的。

表 3.2 国内外部分城市轨道平均站间距一览表

城市	线路长度 (km)	车站数量 (座)	平均站间距 (m)
北京	54	39	1385
上海	65	48	1354
深圳	18.5	18	1028
天津	7.4	8	925
香港	84	44	1909
釜山	73	73	1000
汉城	183	114	1605
大阪	115.6	92	1257
东京	77.2	77	1003
横滨	40.4	32	1263
伦敦	392	267	1468

由上表可见，我国轨道交通站间距与国外城市相比较小，同时，我国城市中由于在轨道交通的规划过程中主要根据城市街道的交叉口布设轨道交通车站，使其间还不足 700~800m 的小站，以天津为例 7.4km 的线路长度平均站间距仅 925m，而与此对应，我国《城市道路交通规划设计规范》国标 50220-95，第 331 条规定：常规公交的站距市区线路为 500~800m；郊区线路 800~1000m<sup>[31]</sup>。因此，在这样的地区，轨道交通由于站间距与常规公交接近有可能不但抢夺了常规公交的客流，同时由于停靠过多，降低了旅行速度，增加了乘客出行时间，也不利于轨道交通快速优势的发挥。

按照我国的国情和各城市的地方财力，不可能在短期内建成高密度的尽善尽美的轨道交通网络，因此在规划的过程中，轨道交通应该确定较大的站间距尽可能提高旅行速度，也能让出几个公交站距的市场给常规公交，发挥常规公交路网稠密的的优势，使二者能协调发展。

#### 3.2.1 轨道交通站间距的影响因素

轨道交通站间距的影响因素较多，主要有以下几个方面：

(1) 居民出行时间

车站间距不仅是轨道网规划和系统运行的重要影响因素，而且会影响轨道乘客的出行时间和轨道交通出行的需求量。乘客出行时间与站点间距的关系如图 3.1 所示<sup>[23]</sup>。

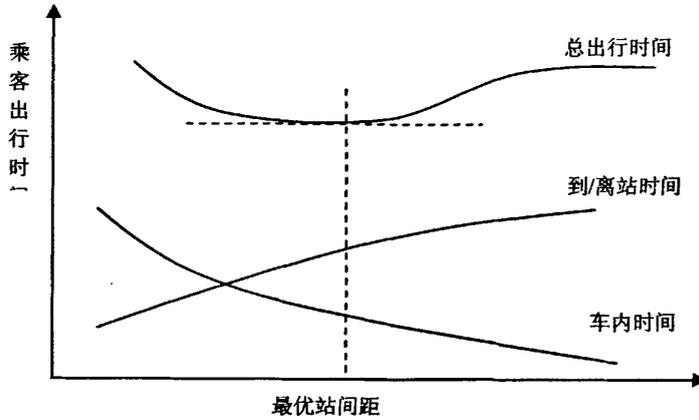


图 3.1 乘客出行时间与站间距关系图

由图 3.1 可见，站间距过大或过小都会导致总出行时间较大，而在这之间存在着某个最优站间距（或者最优站间距的某一邻域）使总出行时间最小，这说明，就节省乘客出行时间方面，最优站间距理论上是存在的。

(2) 列车运行速度等运营因素

站间距的大小除了直接影响乘客出行时间的大小外，还与其它因素有重要关系。如表 3.3 所示为莫斯科、伦敦、汉堡和巴黎中心区地铁网络特征值的比较。

表 3.3 各大城市中心区轨道交通特征值表<sup>[23]</sup>

参数	城市			
	莫斯科	汉堡	伦敦	巴黎
地域面积 (km <sup>2</sup> )	36	21	20	42
路网密度 km/ km <sup>2</sup>	1.91	1.78	2.88	2.48
枢纽密度 hub/ km <sup>2</sup>	0.75	1.24	2.2	3.92
平均站距 (m)	1260	910	840	470
单位枢纽服务面积 (ha)	133	81	46	26
至枢纽平均步行距离 (m)	438	340	255	190
至枢纽平均步行距离 (min)	7	5	4	3
列车运行速度 (km/h)	44.3	38.1	37.1	26.4
出行综合速度 (km/h)	18.9	19.3	19.4	17.8
10km 出行时间 (min)	32	31	30	34

通过比较分析表 3.3 中各城市轨道网络特征值可以看出，列车运行速度、单个枢纽的平均服务面积以及至枢纽的平均步行距离和时间等都是随着平均站间距的增大而增

大的。这说明，平均站间距与列车运行速度，单个枢纽的平均服务面积、至站点的平均步行距离和时间等有着重要的关系。研究资料<sup>[33]</sup>表明站间距小于 1km 时，列车区间平均运行速度是随站间距的增长而迅速上升的。

同时，比较表 3.3 中的数据还可以验证站间距过大过小都会造成居民总出行时间大的理论。调查<sup>[34]</sup>表明，对于地铁而言，站间距离只有保持在大约 800~1200 米时，到达车站的步行距离或交通距离才比较合理，能够缩短整个出行时间，提高其运营效益。

### (3) 投资费用

轨道线网的规划实施受建设、运营和投资成本的限制，为了确保项目建设不会超出预算，通常各子项目（如站点、线路、车辆等）亦有成本限额。与站距相关的成本包括站点建设成本和轨道运营投资成本（主要是轨道车辆购置成本），站点的建设成本包括站点建筑的建设成本和站点配置设备（如信息发布、查询系统，售票、检票设备等）成本等。

## 3.2.2 站间距优化模型的建立

### 3.2.2.1 站间距优化模型假设

为了方便分析，假设轨道站点乘客的出行起点或终点都在站点吸引范围内（特指轨道交通一次吸引范围，且假设乘客都采用步行方式到达站点），对于换乘乘客是指其换乘点在轨道站点吸引范围内，居民公交出行 OD 分布已知。同时，假设小区的公交出行量仅与小区内的土地使用情况有关，公交出行的比率不随轨道站点位置设置的变化而改变。

### 3.2.2.2 研究现状

我国对最优站间距的研究较少，大多数研究站间距的文献都是以乘客出行时间最小为优化目标，建立最优站距的简化优化方法：一部分文献<sup>[23]</sup>以线路上乘客总出行时间最小为优化目标，并假定客流沿线布均等的情况下，对常规公交线路的最优线路进行了研究；另外一部分文献<sup>[35][36]</sup>以乘客平均出行时间最小为优化目标，建立了轨道线路最优站距的简化优化模型。上述文献都没有从提高总的居民出行效率、列车运行速度和吸引客流量等方面进行详细的探讨。

### 3.2.2.3 目标函数

通过分析轨道站间距的影响因素可以看出，最优平均站间距除了考虑乘客出行时间的影响外，还应考虑车站的造价、线路和车站的运营成本以及列车性能的发挥等重要影响因素。为此，本文以轨道线路系统的总成本（包括建设成本、运营成本以及乘客出行

时间成本和票价成本)最小为优化目标,并考虑客流量随车站间距的概率分布来建立最优间距的优化模型。

### (1) 乘客的平均出行时间

通常,乘客通过其他交通方式与轨道交通的换乘完成一次出行。国外研究建议步行到车站的概率分布符合高斯分布,概率主要分布在 600 米之内,超出 900 米概率迅速下降接近 0<sup>[37]</sup>。

根据出行的全过程,乘坐  $n$  个区间出行的乘客总出行时间为出发点到车站步行时间、中间车站的停站时间、列车的加减速时间和正常运行时间以及车站到目的地的时间之和(由于候车时间是行车间隔时间的函数、不直接受站距的影响,在此可以不予考虑)。

#### ① 乘客出行两端的平均步行时间 $T_{\pm}$

出行两端的步行时间与乘客选择的上下车站有关,如图 3.2 示,假设按出行时间最小选择上下车站,那么,上车前的步行时间  $T_{\pm}$  为:

$$T_{\pm} = \min((d-x)/v_j, x/v_j + t_a + (d-S_a)/v_c) \quad (3.1)$$

式中:  $v_j$ —接运方式的速度 (km/h)

$v_c$ —列车正常的运行速度 (km/h)

$d$ —轨道站点的最优站间距 (km)

$t_a$ —列车进出站减速和加速过程的行驶时间 (h), 可用  $t_a = 2\frac{v_c}{a}$

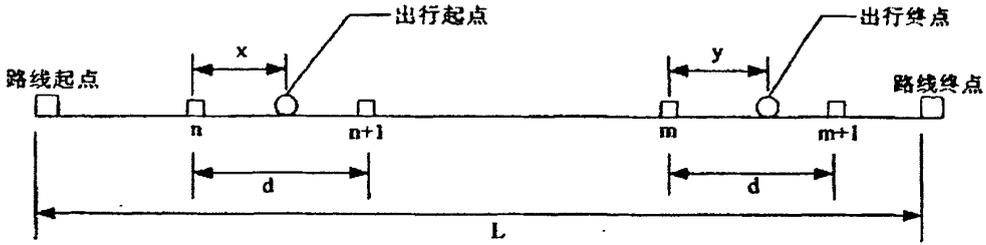
来表示,  $a$  为列车的加速度, 根据列车常规性能参数, 常取  $1\text{ m/s}^2$  或  $0.75\text{ m/s}^2$ 。

$S_a$ —列车进站由正常速度减速至停车的行驶距离以及出站启动加速到正常速

度的行驶距离之和(km),  $S_a = \frac{v_c^2}{a}$ 。

则, 下车后的步行时间  $T_{\mp}$  为:

$$T_{\mp} = \min(y/v_j, (d-y)/v_j + t_a + (d-S_a)/v_c) \quad (3.2)$$


 图 3.2 乘客上下车站示意图<sup>[23]</sup>

分别令式(3.1)和(3.2)函数中两项相等可求取选择相邻两车站上车或下车的界限，即：上车时出行起点与第  $n$  站的距离  $x$  为：

$$x = d(1 - v_j / v_c) / 2 + v_j(S_a / v_c - t_a) / 2 \quad (3.3)$$

下车时出行终点与第  $m$  站的距离  $y$  为：

$$y = d(1 + v_j / v_c) / 2 - v_j(S_a / v_c - t_a) / 2 \quad (3.4)$$

考虑线路垂直方向步行时间在内的乘客出行的平均步行时间  $T_w$  约为：

$$T_w = (b + x) / (2v_j) + (b + y) / (2v_j) = (2b + d) / (2v_j) \quad (3.5)$$

其中： $b$ ——轨道交通线路的吸引带半径 (km)

② 乘坐  $n$  个区间 ( $n=1, 2, \dots, \text{int}(L/d)$ ) 中间车站的停车时间  $T_s$

$$T_s = (n - 1) \cdot s \quad (3.6)$$

其中： $s$ ——列车在站停车时间

③ 乘坐  $n$  个区间列车的正常运行时间  $T_R$

$$T_R = n \cdot (d - S_a) / v_c \quad (3.7)$$

④ 乘坐  $n$  个区间列车的加减速时间  $T_a$

$$T_a = n \cdot t_a \quad (3.8)$$

则乘坐  $n$  个区间一次出行的乘客出行总时间  $T_n$  为：

$$T_n = T_w + T_s + T_R + T_a = (b + d/2) / v_j + (n - 1)s + n(d - S_a) / v_c + nt_a \quad (3.9)$$

故乘坐  $n$  个区间的所有乘客总出行时间之和为  $T_{n\text{总}}$  为：

$$T_{n\text{总}} = Q_i' \cdot T_n = Q_i' [(b + d/2) / v_j + (n - 1)s + n(d - S_a) / v_c + nt_a] \quad (3.10)$$

其中： $Q_i^n$ ——第*i*年乘坐*n*个区间的乘客流量（人次/日）

由此可得，第*i*年轨道线路所有乘客的平均出行时间 $\bar{T}$ 为：

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \sum_{n=1}^{\text{int}(L/d)} T_{n\text{总}} / Q_i = \sum_{n=1}^{\text{int}(L/d)} (Q_i^n / Q_i) \cdot T_n \\ &= \sum_{n=1}^{\text{int}(L/d)} f_n \cdot [(b+d/2)/v_j + (n-1)s + n(d-S_a)/v_c + nt_a] \end{aligned} \quad (3.11)$$

### (2) 乘客流 I 随乘坐区间的概率分布 $f_n$

车站间距不同，不仅会影响轨道乘客的出行时间，而且会影响乘客乘坐轨道线路的长度和区间数，因此  $f_n$  是车站间距  $d$  的函数。根据广州市地铁一号线乘客乘坐地铁区间数的调查研究发现<sup>[38]</sup>，经  $\chi^2$  拟合优度检验，乘客乘坐区间数的概率分布近似符合泊松分布，其分布函数为：

$$P(k) = \lambda^k \cdot \exp(-\lambda) / k! \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (3.12)$$

式中： $P(k)$  为乘坐  $k$  个线路区间乘客的概率； $\lambda$  为乘坐的线路区间的平均数。

由于乘客在利用轨道线路出行时，乘坐的区间数至少为 1，而至多为  $\text{int}(L/d)$ ，因此，有必要对上述概率分布函数进行修正，因此乘坐  $n$  个线路区间乘客的分布概率为：

$$f_n = \frac{\lambda^n \cdot \exp(-\lambda)}{n!} / \sum_{k=1}^{\text{int}(L/d)} \lambda^k \cdot \exp(-\lambda) / k! \quad (1 \leq n \leq \text{int}(L/d)) \quad (3.13)$$

式中：唯一参数  $\lambda$  可以通过平均乘行距离  $\bar{L}$  来求取，即有  $\lambda = \bar{L} / d$ 。

### (3) 决策变量 $d$ 的约束条件

在实际情况下，轨道车站间距  $d$  有上下限的约束： $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ ，即车站最优间距应介于最小间距  $d_{\min}$  和最大间距  $d_{\max}$  之间。

通常情况下， $d_{\min}$  应不小于规范<sup>[31]</sup>中规定的公共交通站距的最小值 500 米，考虑列车行驶的技术条件， $d_{\min}$  不应小于车辆加速达到正常运营速度再减速停止所需的最小行使距离  $l_s$ ，可取  $d_{\min} = a$ ，根据上海地铁二号线与广州地铁一号线所采用的德国车辆的技术资料，理想状态下，列车能实现 80km/h 的最小站间距为 1.012 千米；而最大间距  $d_{\max}$  可根据车站所在的城市区域，参照国外城市经验选取，并且不能大于乘客的平均乘行距

离 $\bar{L}$ ，据对各城市站间距的对比分析， $d_{\max}$ 最大没有超过3000米。

(4) 通过以上分析，站间距优化模型为：

$$\begin{aligned} \min_d C(d) = & [\text{int}(L/d) + 1]C_s + [\text{int}(L/d) + 1][\sum_{i=1}^P C_i / (1+r)^i] \\ & + 365 \times d [ \sum_{n=1}^{\text{int}(L/d)} n f_n ] [ \sum_{i=1}^P \frac{Q_i (\beta_i + \varphi_i)}{(1+r)^i} ] \\ & + 365 \times \bar{T} \sum_{i=1}^P \frac{Q_i \theta_i}{(1+r)^i} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{T} = \sum_{n=1}^{\text{int}(L/d)} f_n \cdot [(b+d/2)/v_j + (n-1) \cdot s + n \cdot (d - S_o)/v_c + n \cdot t_o] \\ f_n = \frac{\lambda^n \cdot \exp(-\lambda)}{n!} / \sum_{k=1}^{\text{int}(L/d)} \lambda^k \cdot \exp(-\lambda) / k! \quad (1 \leq n \leq \text{int}(L/d)) \\ \lambda = \bar{L} / d \\ a \leq d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \leq \bar{L} \end{cases}$$

式中：等号右边第一项为车站的建设成本，第二项为车站的运营成本，第三项为线路运营成本和乘客的票价成本，第四项为乘客出行的时间成本。

$C$ ——轨道线路系统在寿命周期内的总成本（元）；

$\text{int}()$ ——取整函数，即取小于或等于括号（）里数字的的最大整数；

$L$ ——轨道线路的长度（km）；

$P$ ——轨道线路的寿命期（年）；

$C_s$ ——每座车站的造价高出相应长度线路造价的值（元/座）。假设各车站相等；

$r$ ——贴现率（%）；

$C_i$ ——每座车站第  $i$  年的运营和维护成本（元）。假定它与车站集散客流量无关，并且各车站相等；

$f_n$ ——乘坐  $n$  个区间的乘客流量的概率分布，假定每年的概率分布都相同；

$Q_i$ ——第  $i$  年轨道线路乘客的出行总量（人次/日）；

$\varphi_i$ ——第  $i$  年每人公里的票价（元/人公里）；

$\beta_i$ ——第  $i$  年每人公里的线路运营和维护成本（元/人公里）；

$\theta_i$ ——第  $i$  年的时间货币价值（元/小时）；

$\bar{T}$ ——利用轨道线路出行的乘客一次出行的平均出行时间（小时）。由于假定乘坐  $n$  个区间的乘客流量的概率分布  $f_n$  每年相同，因此  $\bar{T}$  每年也相同。

### 3.3 优化站间距求解方法及结果分析

轨道站间距优化模型式 (3-15) 中，其实只有一个连续型变量  $d$ ，由于很难得到乘客平均时间以及  $f_n$  关于站间距  $d$  的显性表达式，因此也就无法采用求导数并令导数等于零的方法来求取车站的最优间距。因此，本文采用 VF 写计算机程序，通过模拟搜索的方法<sup>[23]</sup>试算，得到几种情况下的最优间距理论值，最后结合实际对其进行调整。

由于难以获得轨道车站和线路的建设成本以及运营维护成本的有关资料，无法完全按照目标函数的要求进行实证分析。因此，在下述的分析过程中，仍以乘客的平均出行时间最小为优化目标，即在目标函数中只考虑等号右边第四项的内容，约束条件不变。

本文利用西安市地铁一号线的有关数据，编写了以乘客平均出行时间最小为目标的最优站间距计算程序（源代码见附录一），生成图 3.3 所示的可执行界面。其中计算参数为：轨道线路长度（运营中期） $L=24.95\text{km}$ 、平均乘行距离  $\bar{L}=8.02\text{km}$ 、停站时间  $s=30\text{s}$ 、列车正常行驶速度  $v_0=50\text{km/h}$ 、列车的加减速度  $a=1\text{m/s}^2$ 、接驳方式速度  $v_j=1.25\text{m/s}$ 、轨道线路吸引带半径  $b=750\text{m}$ 。

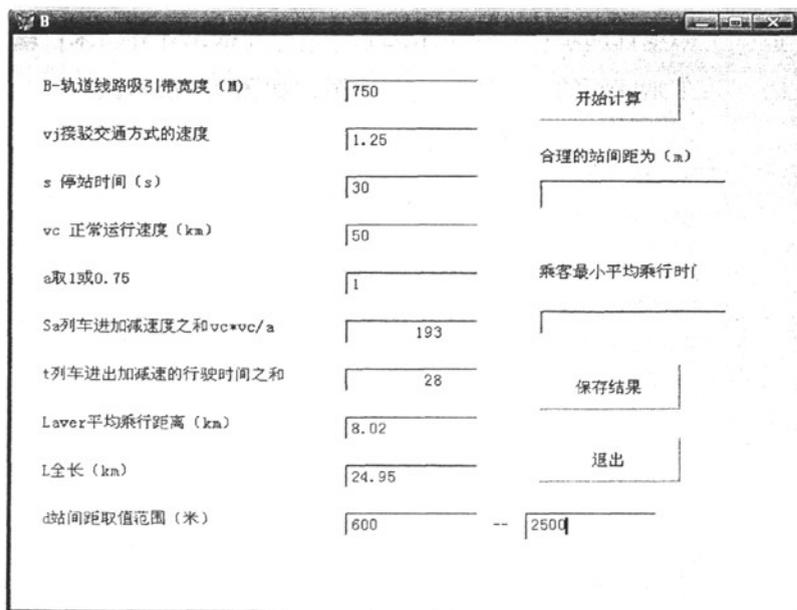


图 3.3 平均站间距计算界面

西安市地铁一号线各运营期间线路长度为：运营初期 2016 年：一号线（后围寨~纺

织城段), 24.95km。运营中期 2023 年: 一号线(后围寨-纺织城段), 24.95km。运营远期 2038 年轨道供给(规划网络形成): 一号线(森林公园-纺织城), 31.8km; 临潼线, 17.4 km。西安市地铁一号线各运营期间平均乘距如下图所示:

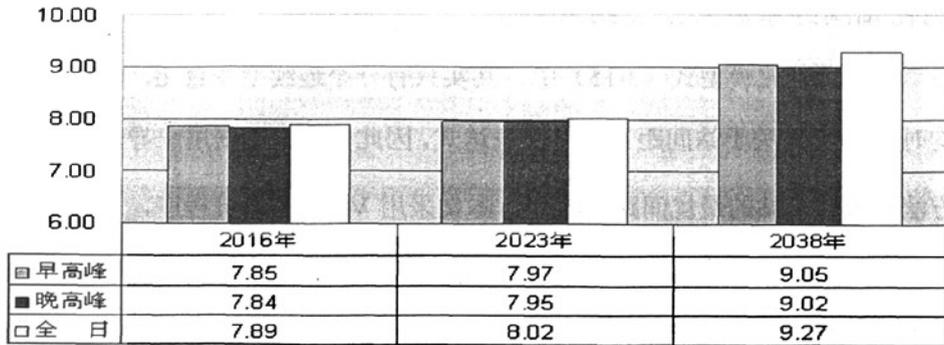


图 3.4 西安市地铁一号线运营期间平均乘距图<sup>[39]</sup>

从预测结果来看, 地铁一号线的平均乘距较长, 初近期基本在 8km 左右, 远期由于线路延长至森林公园, 同时东端临潼线的引入, 使得乘距有个跃升, 达到 9.27km, 这也说明了轨道交通主要是服务于中长距离出行的乘客。因运营远期涉及到城际轨道(后围寨-森林公园段在咸阳市域内), 故本文运用运营中期的轨道线路长度和平均乘距来推算平均站间距。

通过模拟搜索的方法(在车站的最小间距与最大间距之间搜索, 每搜索一次车站间距增加 10 米, 并根据西安市实际情况选取最小站间距为 600 米、最大站间距为 2500 米), 得到几种情况下的最优间距, 具体结果见表 3.5。并根据计算结果, 绘制了所有乘客的平均出行时间随车站间距的变化情况的曲线图, 如图 3.5 所示。

表 3.5 不同情况下的最优站间距值

线路长度 (km)	平均乘距 (km)	停站时间(s)	接驳速度 (m/s)	加减速速度 ( $m/s^2$ )	正常运行速度 (km/h)	最优站间距 (m)
24.95	8.02	20	1	1	50	770
24.95	8.02	20	1	0.75	50	820
24.95	8.02	20	1.25	1	50	850
24.95	8.02	20	1.25	0.75	50	920
24.95	8.02	30	1	1	50	870
24.95	8.02	30	1	0.75	50	910
24.95	8.02	30	1.25	1	50	960
24.95	8.02	30	1.25	0.75	50	1020
24.95	8.02	20	1	1	65	820
24.95	8.02	20	1	0.75	65	860
24.95	8.02	20	1.25	1	65	900
24.95	8.02	20	1.25	0.75	65	950
24.95	8.02	30	1.25	1	65	1020
24.95	8.02	30	1.25	0.75	65	1080
24.95	8.02	30	1	1	65	890
24.95	8.02	30	1	0.75	65	960
24.95	8.02	30	1	1	70	910
24.95	8.02	30	1	0.75	70	980
24.95	8.02	30	1.25	1	70	1010
24.95	8.02	30	1.25	0.75	70	1090
24.95	8.02	20	1	1	70	820
24.95	8.02	20	1	0.75	70	890
24.95	8.02	20	1.25	1	70	920
24.95	8.02	20	1.25	0.75	70	970
24.95	8.02	20	1	0.75	80	910
24.95	8.02	20	1	1	80	840
24.95	8.02	20	1.25	1	80	950
24.95	8.02	20	1.25	0.75	80	1020
24.95	8.02	30	1	1	80	930
24.95	8.02	30	1	0.75	80	1000
24.95	8.02	30	1.25	1	80	1060
24.95	8.02	30	1.25	0.75	80	1110

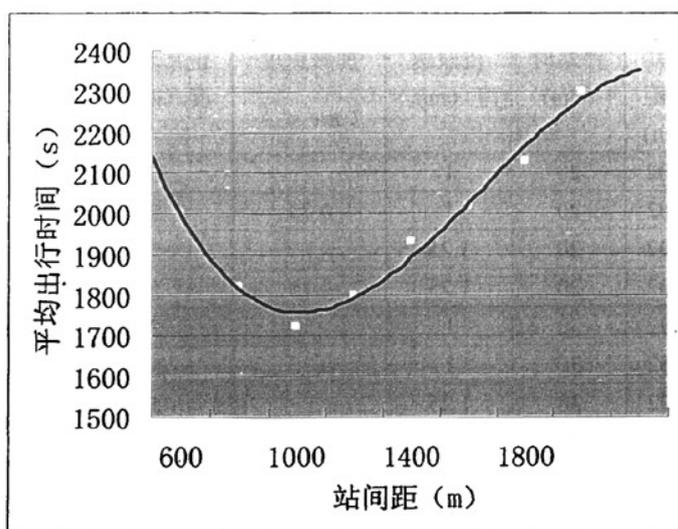


图 3.5 乘客平均出行时间与车站间距的关系曲线图

由 3.5 图可以看出，站间距取 1000m~1200m 范围内的某值，乘客平均出行时间最小，最小站间距为 1050m。由于不同的城市、不同的轨道交通系统，在实际运营过程中，乘客的平均乘行距离、接驳方式和接驳距离、车站内部的走行距离、停站时间、车辆的加减速性能以及正常行驶速度等因素都会有所不同，同时车站间距对乘客流量的大小，线路工程的建造和运营成本、乘客的出行时间以及车站周围用地的发展等方面将产生错综复杂的影响，因此，在进行轨道车站布设时，应综合考虑各种因素，合理的确定车站间距，结合实际对最优车站间距理论值进行调整。

通过最优站间距的计算，可以得到乘客出行时间最小的最优站间距的大致范围。乘客出行方式为轨道交通或轨道换乘常规公交或常规公交换乘轨道时，乘客乘坐轨道交通出行时间最小可导致乘客出行总时间最小。从而，节约出行时间、提高出行效率。

### 3.4 小结

本章首先在分析站点分布影响因素的基础上，建立了以轨道线路系统总成本最小为优化目标的站间距优化模型，并考虑用轨道乘客流量随站间距的概率分布来建立模型，采用 VF 程序模拟搜索方法求解最优站间距，并对计算结果进行了分析。

## 第四章 协调城市轨道交通的常规公交线网研究

### 4.1 地面常规公交线网调整的目标与原则

#### 4.1.1 调整的必要性分析

##### (1) 增加轨道交通客流量的需要

城市轨道交通要形成完善的网络系统需要一个长期的发展过程。即使轨道交通已经形成网络，其覆盖面与线网密度也不可能达到常规公交的程度。因此与地面道路交通系统，特别是常规公交系统的配合与衔接，对扩大轨道交通的吸引范围，增加其客流量具有重要的作用。

##### (2) 轨道交通持续发展的需要

城市轨道交通建设投资量大、运营成本高，这是制约其在我国发展的一个瓶颈因素。但轨道交通运行每乘客公里的成本随着客流量的增加而下降，在很高的设施使用率条件下，平均成本函数可以下降到常规公交之下。所以通过合理的规划方法引导城市客流换乘轨道交通，增加轨道交通客流量，是提高轨道交通经济效益，实现其持续发展的有效途径。

##### (3) 优化常规公交网络布局的需要

城市轨道交通运量大、速度快、安全、便捷，其投入运营势必会给影响区域的常规公交线路带来冲击。原来运行稳定的常规公交网络因为轨道交通的介入而变得不再合理，这就需要根据新的情况重新调整，以保持常规公交网络运转的协调性与高效性。

#### 4.1.2 调整的目标

协调轨道交通的常规公交线网调整，其规划目标与一般公交线网规划有所不同，因为其所追求的不单是常规公交的效率与效益，而更重要的是包括城市轨道交通在内的整个城市公共交通系统的效率与效益，协调轨道交通的常规公交线网调整目标见表 4.1。

表 4.1 协调轨道交通的常规公交线网调整目标

序号	目标
1	为更多的城市公交乘客提供服务
2	使全体乘客的总出行时间最短
3	城市公交线路网网的效率最大
4	保证适当的公交线网密度，即良好的可达性
5	保证适当的公交服务面积率，即较少公交盲区

与一般公交线网规划相类似，协调轨道交通的常规公交线网调整，也是一个多目标规划问题。处理这种多目标规划问题的方法很多，常用的有三种，一是将多个目标合并

为一个目标函数；二是先对一个核心目标求最优解，对其它目标以约束形式获得可行解；三是对所有目标采用多目标综合决策支持。具体方法见参考文献<sup>[23]</sup>。

#### 4.1.3 调整的原则

在我国各大城市中，均是先有地面常规公交，而后有轨道交通。轨道交通的引入，必然要求对原有公交线网作必要的调整与优化，使得交通资源得到合理的重组与整合，形成衔接顺畅的常规公交与轨道交通组合网络。

轨道交通与常规公交组合线网协调规划的主旨是它们之间应互相协调，互相补充，不因重复建设而引起资源浪费，注重运力配备的相对均衡，线网的组合设计应该遵循以下几个原则<sup>[23][25][27]</sup>。

(1) 沿轨道交通线路走向，结合轨道交通车站的布置，尽可能的增加与轨道线路垂直或交叉方向的常规公交线路。

(2) 将轨道交通线路两端的常规公共交通线路的终点尽可能地汇集在轨道交通终点，并增设以轨道交通车站为起点的常规公交接运线路，组成换乘站，以接运轨道交通乘客和快速的疏解客流，同时方便乘客。

(3) 改变常规公共交通线路，尽量做到与轨道交通车站交汇，以方便换乘。

(4) 在轨道交通线路客流超饱和的局部路段，可以保留部分公共汽车线路，起一定的分流作用，但重叠长度不宜超过 4km，根据初步统计分析，常规公交与轨道交通重合超过 4km，就失去了分流的优势<sup>[11]</sup>。在城市某些繁华地区，客流集中，单靠轨道交通难以完全承担，常规公交仍要起到辅助分流的作用。

(5) 在进行公交线网调整时，近期应保留部分合理的公交线路，因为人们对新设公交线路需一个比较长时间的熟悉过程，经常或大规模的变动公交线路会给居民乘车带来很大不便。

## 4.2 调整的基本原理

协调城市轨道交通的常规公交线网调整，主要是从协调的角度出发，把轨道交通线路作为已知条件，以轨道交通的影响区域为研究范围，在城市公交客流 OD 矩阵的基础上，对研究范围内的常规公交线网进行优化调整。本文只对城市中一条轨道线路交通吸引范围内的常规公交线网的调整进行研究。

对于常规公交线网的优化，目前方法很多，但大多数仅限于理论研究，很难在实际中操作。以往的多数研究侧重于以接运效率最大为目标进行常规公交线网调整，很少用

公交客流 OD 矩阵来调整常规公交线网；即使调整了公交客流 OD 矩阵，也没很好地用于常规公交线网的调整。所以本文根据现有的城市公交客流 OD 矩阵的调查和预测结果，通过交通方式划分和交通流分配，结合第二章确定的轨道交通吸引范围，对轨道交通吸引范围内的公交线网就行调整。

在以上思路的指导下，协调城市轨道交通的常规公交线网调整基本工作步骤是：

Step1: 对城市公交客流 OD 矩阵进行修整，在城市公交 OD 矩阵已知的条件下，用 Logit 模型得出轨道交通和常规公交的划分率及各自的 OD 矩阵。

Step2: 把得到的两种交通方式的 OD 交通量分配到路段，研究轨道交通吸引范围内的交通流量，在分析现状常规公交的基础上，根据公交调整原则对原有常规公交线网中的线路进行优化。

Step3: 对原有公交线网中的线路进行优化之后，根据现实情况，合理地新增一些接运公交线路，进一步优化公交线网。

其中第一步、第二步是基础，也是整个线网调整工作不同于一般公交线网规划的特别之处。

### 4.3 调整方法

城市交通生成预测、出行分布预测和交通方式划分预测之后，得到城市公交客流 OD 矩阵，这些工作在城市轨道交通线网规划中都已包括，可根据情况直接引用。从城市公交客流 OD 矩阵中划分轨道交通和常规公交的客流 OD 矩阵，并分配到路段，然后调整轨道交通影响范围内常规公交线网的优化。

#### 4.3.1 轨道交通与常规公交的交通方式划分

研究交通方式之间的分担率问题，Logit 模型是一个有效的模型，Logit 模型的一般形式如 4.1 所示<sup>[40]</sup>。

$$P_i = \frac{\exp(U_i)}{\sum_{j=1}^J \exp(U_j)}, \quad U_i = \sum_k \omega_k X_{ik} \quad (4.1)$$

式中， $P_i$ ——交通方式 i 的客流分担比率；

$U_i$ ——交通方式 i 的效用函数；

J——交通方式个数；

$X_{ik}$ ——交通方式 i 的第 k 个说明要素；

$w_k$ ——待定参数。

我国城市居民在选择出行方式时，主要考虑出行时耗和出行费用这两项因素，轨道交通与常规公交的客流分担率可表示为：

$$p_{ij}^B = \frac{\exp(U_{ij}^B)}{\exp(U_{ij}^B + U_{ij}^R)} \quad (4.2)$$

$$p_{ij}^R = 1 - p_{ij}^B \quad (4.3)$$

$$U_{ij}^B = \alpha t_{ij}^B + \beta c_{ij}^B \quad (4.4)$$

$$U_{ij}^R = \alpha t_{ij}^R + \beta c_{ij}^R \quad (4.5)$$

$p_{ij}^B, p_{ij}^R$ ——从第  $i$  区到第  $j$  区常规公交和轨道交通的客流分担率；

$t_{ij}^B, t_{ij}^R$ ——从第  $i$  区到第  $j$  区常规公交和轨道交通车辆的行驶时间，min；

$c_{ij}^B, c_{ij}^R$ ——从第  $i$  区到第  $j$  区乘坐常规公交和轨道交通的费用，元；

$\alpha, \beta$ ——未知参数。

确定上述所示的模型，其关键在于对效用函数  $U_i$  的确定，使其符合交通出行者的行为特征，这是一个相当复杂的过程。而且效用往往带有很强的主观色彩。考虑到这些问题，对 Logit 模型进行了改良，以相对比较容易量化的广义费用函数来代替效用函数，如式 4.6、4.7 所示。

$$C_{ij}^B = U_{ij}^B = \alpha C^0 t_{ij}^B + \beta f_B^0 (L_{ij} - \frac{D_B}{2}) \quad (4.6)$$

$$C_{ij}^R = U_{ij}^R = \alpha C^0 t_{ij}^R + \beta f_R^0 (L_{ij} - \frac{D_R}{2}) \quad (4.7)$$

式中， $C_{ij}^B, C_{ij}^R$ ——分别表示从  $i$  区到  $j$  区利用轨道交通与常规公交出行的广义费用，元；

$C^0$ ——单位时间价值，元；

$f_B^0, f_R^0$ ——分别表示利用轨道交通与常规公交出行的票价，元/km；

$L_{ij}$ ——从第  $i$  区到第  $j$  区的出行距离；（出行距离=乘车距离+两端步行距离）

$D_B, D_R$ ——分别表示利用轨道交通与常规公交出行量两端出行距离, km;

$\alpha, \beta$  权重系数, 通过调查统计可以获得。式中其余各符号含义同前。其中,

$$t_{ij}^B = \frac{D_B/2}{v_{\text{步}}} + \frac{t_{B\text{间}}}{2} + \frac{L_{ij} - D_B/2}{v_B} \quad (4.8)$$

$$t_{ij}^R = \frac{D_R/2}{v_{\text{步}}} + \frac{t_{R\text{间}}}{2} + \frac{L_{ij} - D_R/2}{v_R} \quad (4.9)$$

$v_{\text{步}}$ ——步行速度, 取为 4.4km/h;

$v_B$ ——常规公交行程车速, 其下限取  $v_{B\text{下}}=15\text{km/h}$ , 上限取  $v_{B\text{上}}=25\text{km/h}$ ;

$v_R$ ——轨道交通的行程车速, 其下限取  $v_{R\text{下}}=35\text{km/h}$ , 上限取  $v_{R\text{上}}=45\text{km/h}$ ;

$t_{B\text{间}}, t_{R\text{间}}$ ——常规公交发车时间间隔和轨道交通的发车时间间隔, 分别取为取为 10min、6min。

将式 4.6、式 4.7 和式 4.8、4.9 代入式 4.2 中, 即可将式 4.2 转换成以出行距离  $L$  为自变量的函数, 如式 4.10 所示。

$$\begin{aligned} p_{ij}^R &= \frac{1}{1 + e^{(C_{ij}^R - C_{ij}^B)}} \\ &= \frac{1}{1 + e^{(\alpha C^0 t_{ij}^R + \beta f_R^0 (L_{ij} - \frac{D_R}{2}) - \alpha C^0 t_{ij}^B + \beta f_B^0 (L_{ij} - \frac{D_B}{2}))}} \\ &= \frac{1}{1 + e^{A+BL}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$A = \frac{1}{2} \alpha C^0 \left( \frac{D_R - D_B}{v_{\text{步}}} + t_{R\text{间}} - t_{B\text{间}} + \frac{D_B}{v_B} - \frac{D_R}{v_R} \right) - \frac{1}{2} \beta (f_R^0 D_R - f_B^0 D_B)$$

$$B = \alpha C^0 \left( \frac{1}{v_R} - \frac{1}{v_B} \right) + \beta (f_R^0 - f_B^0)$$

对于常规公交则有:

$$p_{ij}^B = 1 - p_{ij}^R \quad (4.11)$$

城市公交客流 OD 矩阵与轨道交通、常规公交客流分担率的相乘即可得到轨道交通

客流 OD 矩阵 ( $OD_{ij}^R$ ) 与常规公交客流 OD 矩阵 ( $OD_{ij}^B$ )。

$$OD_{ij}^R = OD_{ij} \cdot p_{ij}^R \quad (4.12)$$

$$OD_{ij}^B = OD_{ij} \cdot p_{ij}^B \quad (4.13)$$

#### 4.3.2 轨道交通与常规公交的交通流分配

交通分配的主要模型有全有全无分配法、最优策略法、最短路法、最优策略，路径搜索法、用户平衡法、随机用户平衡分配法。在实际应用中，随机用户平衡分配法(SUE)能够在假定出行者对于道线网络属性没有全面详尽信息的情况下，兼顾线路费用和线路容量的影响寻求平衡条件，即每个用户选择有最小感觉费用的出行路线<sup>[40]</sup>。模型对流量分配刻画特别科学，在分配中不仅考虑到了效用最大的最短路径，而且还充分考虑到了许多非最短路径。因此，SUE法分配的结果较其他分配方法更为合理。

公交客流分配的基础是公交出行最佳路径的确定。在随机用户平衡分配中，出行者在起点 $r$ 到终点 $s$ 间选择公交路径 $k$ 的概率为：

$$P_k^{rs} = P(c_k^{rs} \leq c_l^{rs}, \forall l \neq k) \quad (4.14)$$

式中： $l, k$ —— $r, s$ 间的路径；

$c_k^{rs}$ ——路径 $k$ 的广义费用。

这时 $P_k^{rs}$ 满足

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-b c_k^{rs})}{\sum_k \exp(-b c_k^{rs})} \quad (4.15)$$

式中： $b$ ——参数，且大于0。

随机平衡条件下，路径上的流量与OD对间的流量关系为：

$$\begin{cases} f_k^{rs} = q_{rs} P_k^{rs} \\ \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \end{cases} \quad (4.16)$$

式中： $f_k^{rs}$ —— $r, s$ 的OD对间路径 $k$ 上的流量；

$\sum_k$ ——任一对OD间的所有路径集合；

$q_{rs}$ —— $r, s$ 的OD对间的流量。

在使用随机用户均衡模型时，定义的费用函数为：

$$c_k^{rs} = \sum_{j \in J} [u_j + VOT(u_x x_j + u_w w_j)] + \sum_{i \in I} [VOT(u_d d_i + u_v t_i (1 + \alpha(v_i / C_i)^\beta))] \quad (4.17)$$

式中： $C_i$ ——为路段*i*服务的公交车的小时容量；

$d_i$ ——在与路段*i*相连接的站点处的滞留时间；

$i$ ——路径*k*所经过的路段标号；

$I$ ——路径*k*所使用的路段集；

$j$ ——路径*k*上所通过的公交线路的标号；

$J$ ——路径*k*上所通过的公交线路集；

$u_j$ ——路线*j*的收费；

$t_i$ ——路段*i*上的公交行驶时间；

$v_i$ ——路段*i*的容量；

$VOT$ ——时间价值比；

$w_j$ ——等待公交线路*j*的时间；

$x_j$ ——公交线路*j*的换乘惩罚时间；

$\alpha, \beta$ ——拥挤参数；

$u_d$ ——滞留时间权重；

$u_v$ ——公交行驶时间权重；

$u_w$ ——等待时间权重；

$u_x$ ——换乘惩罚时间权重。

### 4.3.3 常规公交线网调整

常规公交线路总体上应以轨道交通站点向外呈“鱼骨状”分布，才能达到辐射效果。本文从“点、线、面”三个不同的层次来分析常规公交线路的调整方法。“点”代表公交网络的局部问题，如枢纽点、换乘点和公交线的起终点分布等；“线”代表方向性问题，如线路走向、长度等；“面”指线网的全局性问题，如线网的密度、线网覆盖等。

#### (1) 公交站点的调整

公交站点是公交客流的集散地点，包括客流的发生点、吸引点和客流换乘点。站点位置是否合理，是评价公交线网乘车环境以及乘客的步行时间、候车时间的综合指标。公交服务区域就是以站点为中心向外辐射的。站点的选取直接关系到公交线网的服务范围。其位置的确定应结合轨道站点的位置、轨道沿线道路两侧的土地利用性质及公交的

发生量等来进行, 同时应消除公交空白区。

起终点站的调整: 当设置轨道交通接驳线路时, 可考虑在轨道交通站点附近设置接驳线路的起终点站。如果公交站点的高峰小时流量即总发生量或总吸引量达到设站标准时, 该站点必须设置成起终点站, 否则应设一个或多个中间站点。计算公式如下:

$$C = \frac{60 \cdot R \cdot r}{t_r \cdot k_0} \quad (4.18)$$

式中:  $C$ —起终点站运载能力, 人次/高峰小时;

$R$ —公交车额定载客数, 人;

$r$ —高峰小时满载率, 取为0.85;

$t_r$ —高峰小时发车间隔, min;

$k_0$ —线路上最大断面流量与起点站前断面或终点后断面流量之比, 取1.5~2.0。

中间站点的调整: 一种是位置的调整, 实现站距的优化一种是功能的调整, 即中间站变为起讫站。具体调整应结合轨道线路和站点的位置进行。中间站点位置是否合理, 不仅影响到居民乘车的方便性, 也影响到乘客吸引量的大小。因此, 合理的站点设置可以协调客运能力和交通负荷相互间关系。

## (2) 公交线路调整

用TransCAD交通分配后能够生成图表等形式来反映结果。如: ①流量分配图, 通过该图可以直观了解到客流量在轨道、常规公交路段的分布状况; ②各个站点之间客流量表(Transit Flows)。结合轨道交通影响区域, 得出轨道交通影响区域路段的交通流量; 再根据轨道交通站点的规划规模和公交线网调整原则分析轨道交通吸引范围内轨道交通站点周围的公交线网优化。调整流程图见图4.1。

调整思路为: 将交通流分配图与轨道交通线、常规公交线网层叠加在一起, 先在底层线网中去掉平行于轨道线路的常规公交线路, 分析与轨道线路相交叉的常规公交线路, 采取增加原线路车次、增设新接驳线路等相应措施; 然后根据常规公交调整原则对平行于轨道线路的常规公交线路进行优化。通过乘客换乘时间、换乘系数等目标来评价线网是否合理, 在第五章有详细论述。

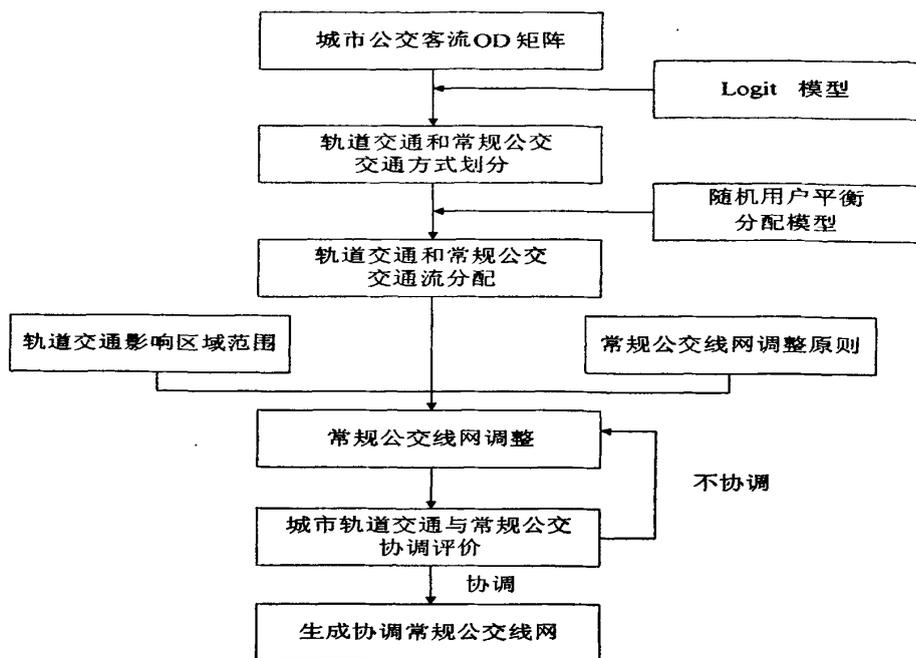


图 4.1 常规公交线网调整流程图

### (3) 公交线网优化

在优化的过程中要考虑的主要约束条件为：

- ① 轨道路线、站点和公交路线、站点的客流能力限制。
- ② 线路长度限制。其中包括：一是接运路线的长度限制。一般来说，接运公交线路长约 6km，不宜超过 8km，路线过长可能使路线的功能复杂化；二是与轨道交通平行的公交线路的长度限制。其长度不应超过 4km，否则就会失去分流的优势。
- ③ 公交运营投入最小。可以通过公交线路满载率最大或重复线条数最小等约束条件来体现。

此外还应考虑两个重要方面：

- ① 接运路线自身的效益(路线效率)和它对轨道路线的作用(接运效益)都应足够大。
- ② 一般接运路线应避免与轨道路线竞争客流，优化应在轨道影响范围区域之外进行。

单一的轨道交通直接吸引范围是有限的，通过地面公交系统与轨道交通系统的多重换乘点，将吸引范围伸展到整个城市，提高线路的有效服务范围，吸引更多的乘客，发挥公共交通的整体效益。因此轨道交通的乘客量还是公交网络的函数，可以通过设置与

轨道交通垂直的公交线网，将轨道交通的辐射吸引范围伸展到城市的各个角落，扩大了轨道交通的服务范围，同时又不与轨道交通竞争客流。

#### 4.4 小结

本章分析了协调轨道交通的常规公交线网协调的基本含义，探讨进行公共交通线网规划时新的轨道交通与常规公交线网规划的协调，推荐构筑以轨道交通为骨干的城市公共交通线网。分析研究了在轨道交通线网布局确定的情况下常规公交路线在轨道交通吸引范围内的局部优化与调整。

## 第五章 城市轨道交通与常规公交协调评价指标体系研究

城市轨道交通与常规公交的协调评价,就是利用各种系统科学和数学方法,对轨道交通与常规公交协调体系的现状或规划方案进行分析,定量评价其协调程度,为制定或改进协调方案提供依据。评价指标体系的建立是评价过程中一个极其重要的环节,评价指标选取是否合理将直接影响评价结果的准确性。本章在前文对城市轨道交通与常规公交协调系统分析的基础上,研究轨道交通与常规公交协调评价指标体系的构建。

### 5.1 评价指标体系的构建

#### 5.1.1 评价指标体系的构建原则

评价是通过一些归类的指标,按照一定的规则与方法,对评判对象从某一方面或全面的综合状况做出优劣评定。为了评价结论尽可能的具有客观性、全面性和科学性,评价指标选取必须遵循一定的选取原则。轨道交通与常规公交协调程度评价应遵循以下原则<sup>[27][43]</sup>:

##### (1)科学性原则

建立的评价指标必须科学地、合理地、客观地反映城市公共交通枢纽的技术性能、经济、社会和环境效益。

##### (2)可比性原则

评价不是检测。检测只需对某一个体进行客观的描述就行,不涉及价值体系;而评价必须以价值为依据来考察不同个体之间、个体与标准之间的相对优劣。因此,必须在平等的可比的价值体系下才能进行,否则就无法判断不同城市公共交通的相对优劣。同时,可比性必然要求具有可测性,没有可测性的指标是难以比较的。因此评价指标要尽量建立在定量分析基础之上。

##### (3)综合性原则

单指标只能从某一侧面反映评价对象的性质,而不能反映个体或系统的整个特性,而一个评价指标体系就应该力求全面地反映评价对象的特性性能,否则就可能使评价失效,给决策带来失误。城市公共交通的评价体系应全面地、可靠地反映公共交通系统的性能、效益和影响。当然,做到这一点是相当困难的,因为该系统是一个涉及许多复杂因素的大系统。

##### (4)可行性原则

选出的评价指标应有数据可比性、量化可能性和技术可行性，指标所构建的体系应能对协调发展提供评价依据，并对其产生的效果做出定量评价。

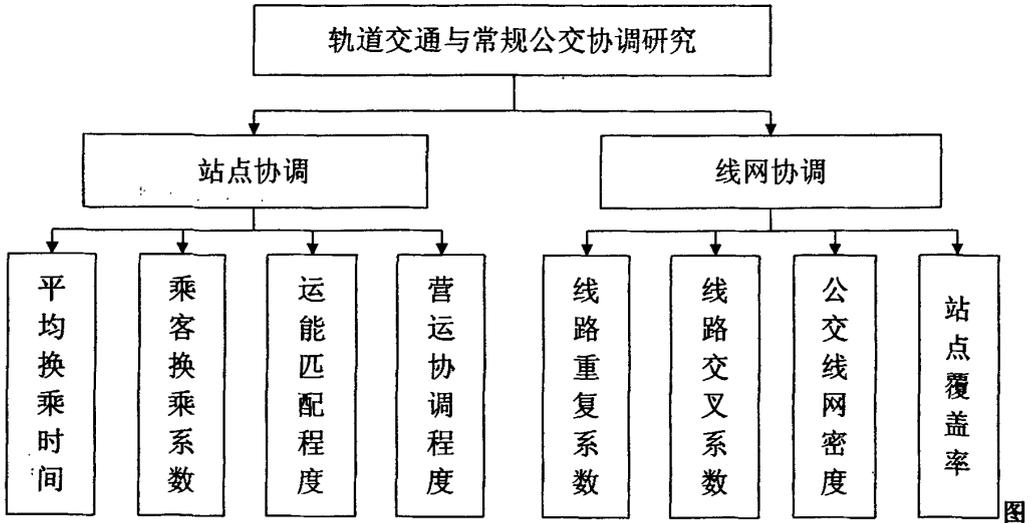
### (5)协调性原则

综合评价的指标较多，指标与指标之间应是相互协调或者是互相兼容的，而不是相互矛盾的、相互冲突的。

## 5.1.2 协调程度评价指标体系的选取

### (1) 评价指标体系的构建

轨道交通与常规公交协调程度评价指标体系应能够全面反映轨道交通与常规公交在各个方面的协调情况及协调程度。根据前文的分析，轨道交通与常规公交的协调主要表现在站点协调和线网协调两方面，基于这一前提，在上述指标选取原则的约束下，本文建立的评价指标体系如图 5.1 所示。



5.1 评价指标体系图

### (2) 评价指标分析及量化

在进行城市轨道交通和常规公交协调评价前，首先对评价体系中的各种指标进行量化，具体各项指标量化方法如下<sup>[23][44]</sup>：

#### ①平均换乘时间

指在全部的城市轨道交通换乘枢纽中，乘客由轨道交通换乘常规公交和由常规公交换乘轨道交通所花费的平均时间。

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (5.1)$$

式中： $T$ ——平均换乘时间；

$N$ ——城市中所有轨道交通换乘枢纽的个数；

$T_j$ ——在第 $j$ 个轨道交通换乘枢纽内，乘客由轨道交通站点行至常规公交站点，和由常规公交站点行至轨道交通站点所花费的平均时间。

平均换乘时间是用来表征城市轨道交通换乘枢纽的形式、规模是否合理，是否有利于轨道交通线网与常规公交线网紧密衔接的指标。平均换乘时间越小，说明轨道交通换乘枢纽的形式、规模越合理，两种公交线网之间的衔接越紧密，越有利于客流交换，协调效果越好。

范围确定：轨道交通一次吸引半径为  $d=750\text{m}$ ，由轨道交通站点行至常规公交站点的最大距离取为  $d/2$ ，换乘时间最高值  $T_{\max}=d/2v_j$ ， $v_j=1.12\text{m/s}$ ，则  $T_{\max}=5.6\text{min}$ 。轨道交通与常规公交同台换乘时， $T_{\min}=0\text{min}$ ，这是极限条件下的换乘时间。一般情况下，换乘时间为  $3\text{min}^{[25]}$ 。

### ②乘客换乘系数

乘客换乘系数指全体公交出行者的平均换乘次数。

$$\gamma = \frac{\sum_{I=1}^N P_I}{P_R} \quad (5.2)$$

式中： $\gamma$ ——乘客换乘系数；

$N$ ——包括轨道交通和常规公交在内的城市公交线路总条数；

$P_I$ ——第 $I$ 条公交线路的客运量（人次）；

$P_R$ ——城市公交总出行量（人次）。

换乘系数反映乘客的直达程度，换乘系数越小，乘客直达性越好，反之，则直达性越差。换乘系数同时也是衡量线网布局和车站布局的合理程度的指标。一般情况下，城市居民单程出行的换乘次数不超过 3 次。《城市道路交通规划设计规范》给出大城市乘客平均换乘系数不应大于 1.5，小城市不应大于 1.3<sup>[31]</sup>。

### ③运能匹配程度

运能匹配程度，指客运高峰小时内，轨道交通换乘枢纽换乘客流量与常规公交运输能力的比值，用来衡量常规公交运输能力与轨道交通运输能力的匹配程度，以判别客运设备的适应性情况。

客运高峰小时轨道交通换乘枢纽与常规公交之间换乘客流量  $P_H$  (人次/小时) 为:

$$\text{对于中间站: } P_H = 2 \times 60(T_K / I + 1)P_m k / T_K \quad (5.3)$$

$$\text{对于首末站: } P_H = 60(T_K / I + 1)P_m k / T_K \quad (5.4)$$

$T_K$ ——客流高峰持续时间(min);

$I$ ——高峰时段内轨道交通车辆到达的平均间隔时间(min);

$P_m$ ——高峰时段内轨道交通平均每趟列车的上(下)车乘客数(人次/辆);

$k$ ——换乘客流量占轨道交通车站上(下)车客流的百分率。

为轨道交通换乘枢纽服务的常规公交客运能力  $P_b$  (人次/小时)为:

$$P_b = 60 N_s B_b J_b \eta_s / I_s + 60 N_p B_b J_b (\eta_t - \eta_r) / I_p \quad (5.5)$$

$N_s, N_p$ ——分别为在轨道交通换乘枢纽常规公交始发和途经的线路条数;

$B_b$ ——常规公交车辆额定载客人数(以标准车计算)(人次);

$J_b$ ——其他车型对标准车的换算系数;

$\eta_s, \eta_t, \eta_r$ ——分别为常规公交车始发线路的满载率、极限满载率和途经线路到达车站时的实际满载率;

$I_s, I_p$ ——分别为高峰时段内始发和途经线路的发车间隔时间(min, )取  $I_s = I_p = I_b$ ,

则:

$$P_b = 60 B_b J_b (N_s \eta_s + N_p \eta_t - N_p \eta_r) / I_b \quad (5.6)$$

式中:  $I_b$ ——高峰时段内常规公交车辆的平均发车间隔 (min)。

运能匹配程度:

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{iH} / P_{ib} \quad (5.7)$$

式中:  $N$ ——城市轨道交通换乘枢纽数;

$P_{iH}$ ——客运高峰小时轨道交通换乘枢纽  $i$  的换乘客流量 (人次/小时);

$P_{ib}$ ——客运高峰小时为轨道交通换乘枢纽  $i$  服务的常规公交客运能力 (人次/小时)。

运能匹配度是轨道交通与常规公交之间的客运供求关系的表征，反应两者衔接的协调状况。运能匹配度  $\rho$  存在一个合理取值范围。当  $\rho \leq 1$  时，两者衔接状况良好， $\rho$  越低，常规公交接运能力相对于换乘客流越剩余，造成客运资源越浪费；当  $\rho > 1$  时，表明常规公交运输能力满足不了轨道交通客流的换乘需要，换乘的协调性被破坏，这时，需采取在客运高峰时段增加常规公交班次，缩短发车间隔，调集应急车辆等措施，暂时提高常规公交运输能力，恢复两者衔接的协调性。

④营运协调程度<sup>[43]</sup>

营运调度的协调可以使乘客在枢纽站点能够方便、迅速、安全地进行不同方式的、不同方向的换乘，从而提高出行效率，并实现客流的高效组织，即根据客流流量、流向，合理调整线路和运力，提高客运交通的效率。

主要评价内容：

- 调度的智能化（利用 GPS 等先进的技术为车辆提供实时的、动态的调度）；
- 调度的集群化（实行新的营运调度管理模式）；
- 调度的信息化（包括车辆满载率、站点候车人数等的实时监控信息）；
- 换乘枢纽的轨道交通与常规公交运输组织的协调（包括客流情况、列车时刻表的衔接等）。

表 5.1 城市公共交通发展政策法规协调分级表

评价标准等级	一	二	三	四
标准	满足四项	满足三项	满足两项	少于两项
指数	[90, 100]	[80, 90)	[70, 80)	[0, 70)

城市轨道交通与常规公交线网协调涉及到不同的子系统和不同的协调层次，对城市轨道交通与常规公交线网协调的评价，应首先通过各单项指标的计算分析不同层次与方面的协调状况，在此基础上分析各个子系统的协调状况，最后以各子系统的重要度为权，得出城市轨道交通与常规公交协调的综合评价结果。

⑤线路重复系数

指在轨道交通的直接吸引范围内，与轨道交通相平行的常规公交线路总长度与轨道交通线路/线网总长度之比。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{G_{\text{总}}} \quad (5.8)$$

式中：

$\alpha$ ——线路重复系数;

$N$ ——在轨道交通的直接吸引范围内, 与轨道线路相平行的常规公交线路条数;

$L_i$ ——第  $i$  条常规公交线路, 其在轨道交通的直接吸引范围内, 与轨道交通相平行的长度;

$G_{\text{总}}$ ——轨道交通线路/线网的总长度。线路重复系数是用来描述轨道交通线路和常规公交线路平行关系的一项指标。一般来说, 为了轨道交通运能够得到充分发挥,  $\alpha$  要求越小越好, 尤其是在轨道交通线路运营初期, 为了鼓励人们选择乘坐轨道交通, 更是如此。

#### ⑥线路交叉系数

指平均每公里轨道交通线路, 与其交叉的常规公交线路条数。

$$\beta = \frac{M}{G_{\text{总}}} \quad (5.9)$$

式中:  $\beta$ ——线路交叉系数;

$M$ ——与轨道交通线路交叉的常规公交线路总条数;

$G_{\text{总}}$ ——轨道交通线路/线网的总长度。

线路交叉系数是用来描述轨道交通线路和常规公交线路交叉关系的一项指标。一般来说  $\beta$  要求越大越好。

#### ⑦公交线网密度

指有公交服务的每平方公里的城市用地面积上, 有公交线路经过的道路中心线长度, 该指标反映了居民接近公交线路的程度。

$$\varepsilon = \frac{L}{S} \quad (5.10)$$

式中:  $\varepsilon$ ——公交线网密度;

$L$ ——有常规公交线路经过的道路中心线总长度;

$S$ ——有常规公交服务的城市用地面积。

根据《城市道路交通规划设计规范》标准, 在中心市区公交线网密度达到 3~4  $\text{km}/\text{km}^2$ , 在城市边缘区公交线网密度达到 2~2.5  $\text{km}/\text{km}^2$ <sup>[31]</sup>。从理论上分析, 全市以 2.5~3.0  $\text{km}/\text{km}^2$  为好<sup>[23]</sup>。通过以上分析, 公交线网密度取值范围确定为 1.5~4.0  $\text{km}/\text{km}^2$ 。

### ⑧ 公交站点覆盖率

公交站点覆盖率亦称公交站点服务面积率，是公交站点服务面积占城市用地面积的百分比，是反映研究范围内站点分布情况的一个重要指标。通常按 300m 半径和 500m 半径计算，《城市道路交通规划设计规范》规定的公交站点覆盖率，按 300m 半径计算，不小于 50%，按 500m 半径计算，不小于 90%<sup>[31]</sup>。

$$\zeta = \frac{A_b}{A} \times 100\% \quad (5.11)$$

式中： $\zeta$ ——公交站点覆盖率；

$A_b$ ——公交站点服务面积（ $m^2$ ）；

$A$ ——城市用地面积（ $m^2$ ）。

## 5.2 轨道交通与常规公交协调程度综合评价

### 5.2.1 评价方法选择

目前综合评价通常采用的方法主要有层次分析法、灰色关联度法、模糊综合评价法等，各种评价方法的特点及适用条件各异，结合城市轨道交通与常规公交协调的评价指标体系的特点，本文采用灰色关联度分析法，在确定评价基准和各方案评价指标值的基础上，通过计算各方案评价指标值序列与参考序列的灰色关联度来对各方案进行综合评价和优选排序。

### 5.2.2 协调程度评价

若将“设计方案合理”视为一个灰色概念，可以认为这种基于单个指标的评价而进行的分析和综合过程，是一种在信息不完全情况下的综合判断，可用灰色关联度分析来描述这一过程<sup>[44]</sup>。方案间关联性大小的度量称为关联度，由于关联度不是唯一的，因此关联度本身的大小不是关键，而各关联度大小的排序更为重要，这便是关联序。若将  $m$  个比较序列对同一参数序列的大小按顺序排列起来，就组成了关联序，它反映了对于参考序列来说，各比较序列的“优劣”关系。灰色关联分析的步骤如下：

#### 1. 灰色关联度分析

##### (1) 确定比较和参考序列

设待评价和选择的方案构成方案集  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ，评价指标体系中各评价指标构成指标集  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ ，集中各方案的各评价指标的评估值构成评价矩

阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

其中第  $i$  个方案各评价指标值形成的序列  $(c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in})$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 就是进行灰色关联分析第  $i$  个方案的比较序列。

城市轨道交通与常规公交协调方案的评价和选择是相对于一定的基准而言, 这种基准成为方案的评价基准。在灰色关联度分析中, 参考序列的确定就是建立方案的评价基准。根据评价指标的实际含义, 可将其分为越大越好型、越小越好型、最佳区间行三种类型, 那么参考序列  $C_0$  的确定方法如下:

$$\text{a. 越大越好型评价指标: } c_{0j} = \max_i \{c_{ij}\} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5.13)$$

$$\text{b. 越小越好型评价指标: } c_{0j} = \min_i \{c_{ij}\} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5.14)$$

c. 具有最佳区间型评价指标:

设该类指标评价值的最佳区间为  $[u_j, v_j]$ , ( $v_j \geq u_j$ ,  $1 \leq j \leq n$ ), 则

$$c_{0j} = (u_j + v_j) / 2, \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5.15)$$

若该类指标评价值的最佳区间难以获得, 则

$$c_{0j} = \sum_{i=1}^m c_{ij} / m, \quad (1 \leq j \leq n) \quad (5.16)$$

最佳区间难以获得时, 也可以参考规范里规定的指标的大致范围。评价基准  $C_0$  主要是由所有待评价和选择的方案各评价指标值“合成”的, 既有先进性, 又有可实现性。

## (2) 各序列数值的无量纲化

采用灰色关联分析方法对方案进行多指标综合评价时, 由于各个指标值有不同的量纲和数量级, 如果采用原始指标值直接进行比较和评价, 可能会导致某些指标参与评价的作用十分微弱, 因此一般都需对原始评价指标值进行无量纲化处理。设经处理后的比较序列为  $X_i = \{X_i(j)\}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ), 无量纲化处理方法如下:

$$X_i(j) = c_{ij} / \bar{c}_j, \quad \bar{c}_j = \sum_{i=0}^m c_{ij} / m \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (5.17)$$

### (3) 求关联系数

方案  $A_i$  和评价基准  $C_0$  在评价指标  $G_j$  上的评价结果之间的差异程度，称为方案  $A_i$  和评价基准  $C_0$  的相似性，用关联系数表示。

设  $X_0 = \{X_0(j) | j=1,2,\dots,n\}$  时为无量纲化后的参考序列，即无量纲化后的评价基准；

$X_i = \{X_i(j) | j=1,2,\dots,n\} (i=1,2,\dots,m)$  为无量纲化后的比较序列，即方案  $A_i$  各指标值无量纲化后所组成的序列，则  $X_i(j)$  和  $X_0(j)$  的关联系数计算方法为<sup>[44]</sup>：

$$\xi_i = \frac{\min_j \Delta_i(j) + \rho \max_j \Delta_i(j)}{\Delta_i(j) + \rho \max_j \Delta_i(j)}, \quad \Delta_i(j) = |X_0(j) - X_i(j)| \quad (5.18)$$

分辨系数  $\rho \in (0, +\infty)$ ， $\rho$  越小，分辨能力越大，一般取 0.5。

各方案的关联系数组成关联矩阵  $\xi$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \xi_{m1} & \xi_{m2} & \cdots & \xi_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

### (4) 求关联度

从关联系数矩阵的组成来看， $\xi_{ij}$  是方案  $A_i$  的比较序列  $C_i$  与参考序列  $C_0$  关于评价指标  $G_j$  的关联系数值。由于得到的关联系数较多，信息过于分散，不便于比较和分析，因而将每一个比较序列关于各个评价指标的关联系数集中体现在一个数值上，这一数值就是灰色关联度。比较序列  $C_i$  与参考序列  $C_0$  的平均灰色关联度  $\gamma_i$  为：

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \xi_i(j) / n \quad (5.20)$$

因为各评价指标对衡量方案优劣的相对重要程度是有差别的，所以在灰色关联度的计算中应按评价指标的相对重要程度大小赋予相应的权重系数  $w_j (j=1,2,\dots,n)$ ，且

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (w_j \geq 0).$$

$$\text{则加权平均灰色关联度为 } \gamma_i = \sum_{j=1}^n \xi_i(j) \cdot w_j \quad (5.21)$$

灰色关联度  $\gamma_i$  越接近于 1, 表明方案  $A_i$  按照相应的评价规则与评价基准的相似性越接近, 方案效果就越好。

## 2. 评价指标的权重计算<sup>[44]</sup>

权重系数的确定方法很多, 如层次分析法、德尔菲法、离差法、均方差法等, 层次分析法(Aalytie Hierarehy Proecess), 简称 AHP 法, 是美国运筹学家沙旦(.TL.Saaty)在 20 世纪 70 年代提出的。其基本思想是: 把复杂的问题分解成各个组成元素, 按支配关系将这些元素分组、分层, 形成有序的递阶层次结构, 在此基础上形成两两比较方式判断各层次中诸元素的重要性, 最后利用判断矩阵, 确定诸元素在决策中的权重<sup>[44]</sup>。这一过程体现了人们决策的基本特征, 即分解—判断—综合。该方法以其系统性、灵活性、实用性等特点被广泛用于科学决策和项目评价中。本文采用层次分析法确定各指标权重系数。

### (1) 构造判断矩阵

对每一层次中的各因素进行判断比较, 判断各因素的相对重要性, 这些判断用数值表示成矩阵形式, 即为判断矩阵。判断矩阵表示层次结构模型中, 对上一层因素来说, 本层次所有因素之间的相对重要程度, 采用两两比较的方法来确定。假设对上一层  $A$  中因素  $A_i$  而言, 下一层  $B$  中的  $n$  个因素  $B_i$  与  $B_j$  的相对重要性为  $b_{ij}$ , 则构造的判断矩阵如图 5.2 所示:

$b_{ij}$  是判断矩阵  $B$  的元素, 表示因素  $A_i$  中  $B_i$  相对于  $B_j$  的重要程度,  $b_{ij}$  的取值可根据 AHP 法提出的 9 级标度法(表 5.2), 由专家咨询法确定。

$A_i$	$B_1$	$B_2$	...	$B_n$
$B_1$	$b_{11}$	$b_{12}$	...	$b_{1n}$
$B_2$	$b_{21}$	$b_{22}$	...	$b_{2n}$
...	...	...	....	...
$B_n$	$b_{n1}$	$b_{n2}$	...	$b_{nn}$

图 5.2 判断矩阵图

注：此矩阵的元素  $b_{ij}$ ，具有如下性质： $b_{ij} > 0$ ； $i=j$  时， $b_{ij}=1$ 。

表 5.2 9 级标度法

相对比值	权重比值含义
1	两评价指标同样重要
3	一评价指标比另一评价指标稍微重要
5	一评价指标比另一评价指标明显重要
7	一评价指标比另一评价指标更重要
9	一评价指标比另一评价指标绝对重要
2, 4, 6, 8	处于两相邻判断的中值
倒数	评价指标相比： $B_i$ 与 $B_j$ 相比等于 $B_{ij}$ ，则 $B_j$ 与 $B_i$ 相比为 $1/B_{ij}$

(2) 层次权重值得确定及一致性检验

为防止一致性偏差太大而影响评价结果，当判断矩阵的维数  $n > 2$  时，须引入度量判断矩阵偏离的一致性指标  $CR$  测试评判的一致性和可靠性， $CR$  的计算公式如下：

$$CR = CI / RI \tag{5.22}$$

其中： $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ ， $RI$  的取值见表 5-3。

表 5.3 RI 取值表

维数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

若  $CR < 0.10$ ，则认为判断矩阵具有满意的一致性，否则需调整判断矩阵的元素值。

3. 评价标准的确定

为了全面、客观的反映轨道交通与常规公交的协调性情况，本文参照国内外各种评价指标的分级方法，确定评语集。指标的评价标准见表 5.4。

表 5.4 指标的评价标准

指标值	0~0.4	0.4~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~1.0
评语	失调	弱协调	可协调	较强协调	强协调

方案评价结果根据表 5.4 中的指标评价标准和灰色关联度分析，确定可选方案。

5.3 小结

本章确定了城市轨道交通与常规公交的协调评价指标和评价方法，定量评价其协调程度，为制定或改进协调方案提供依据。

## 第六章 实例研究

本文依托西安市即将全线开工建设的轨道交通 1 号线后围寨~纺织城段（初期），应用前述协调轨道交通的常规公交线网优化调整理论与方法对轨道 1 号线直接吸引范围内的常规公交线路进行分析研究，并提出调整规划建议。

### 6.1 西安市轨道交通规划概况

#### 6.1.1 西安市快速轨道交通规划概况

根据西安市城市布局形态、主要客流集散点、地面道路网的功能特点以及土地利用性质，西安市城市快速轨道交通线网规划远景方案由 6 条线路构成，见图 6.1<sup>[45]</sup>。线网全长 251.8km，其中设车站 150 座（不含 1 号线东、西延伸段），10 座车辆段，4 座停车场。西安市快速轨道交通线网规划以 1、2、3 号线为骨干线，4、5、6 号线为辅助线，形成“棋盘+放射型”网状结构，为了配合西安市城市总体规划的实施，同时结合轨道交通建设投资大、周期长的特点以及城市交通发展的战略和交通需求，根据《西安市城市快速轨道交通线网规划》提出轨道交通线网分以下四个阶段进行实施<sup>[30]</sup>：

第一阶段（2006~2011 年）：建设 2 号线（铁路北客站~韦曲，26.4 公里），以缓解城市南北向主客流走廊的交通压力，为城市中心区的逐步外移、市政府北迁及郑州至西安客运专线西安火车站密集客流的疏导创造有利条件，同时拓展西安市空间结构，引导城市向北向南发展。

第二阶段（2010~2015）：建设 1 号线（后围寨~纺织城，24.95 公里），形成西安市主城区“十字”型轨道交通骨架网，以缓解城市东西向及南北向主客流走廊的交通压力，同时双方向拓展城市空间，加快城市郊区经济发展，为西咸一体化及临潼旅游区的发展创造便利的交通条件。

第三阶段（2016~2020 年，远期）：建设 3 号线（44.3 公里），进一步优化中心城区线网结构，扩大线网规模，同时加强主城核心区与外围组团的联系，支持城市新中心的形成。

第四阶段（2021~2050，远景）：建设 4、5、6 号线和 1 号线东、西延伸段及 2 号线北延伸段（157.2 公里），完善主城核心区内部轨道交通网及对外交通联络，完善线网覆盖范围和密度，提高快速轨道交通系统的服务水平，形成西安市完整的城市快速轨道交通网络。

依据规划,西安市在轨道交通线网形成后,主城区内的线网密度为  $0.338\text{km}/\text{km}^2$ ,明城区内线网密度  $1.146\text{km}/\text{km}^2$ ,三环以内区域为  $0.375\text{km}/\text{km}^2$ 。线网客流覆盖率为  $85.2\%$ ,服务范围覆盖了全市 61 个主要客流走廊和大型客流集散点中的 52 个,线路直接连接或延伸方向辐射中心城镇和外围组团,全日客流量将达到 509.5 万人次,承担居民出行总量的比例为  $25\%$ ,占公交总量的  $50\%$ 。

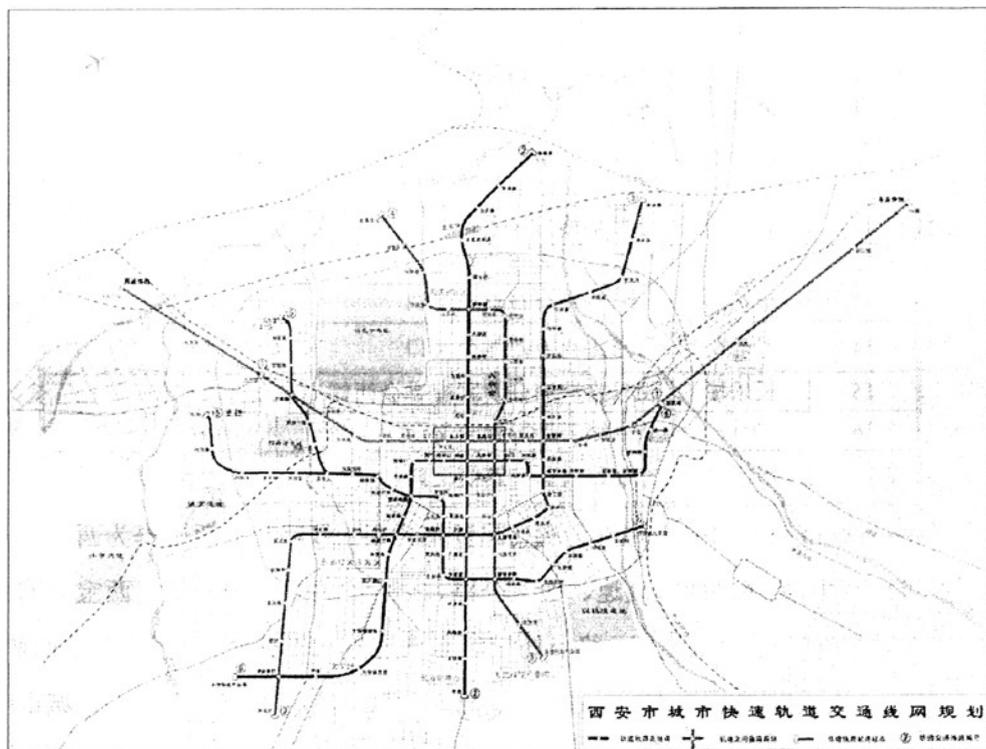


图 6.1 西安市城市快速轨道交通线网规划图

### 6.1.2 地铁 1 号线（后围寨～纺织城）概况

线路西起西安市西大门后围寨,沿枣园路一路东行,经阿房路、城西客运站、至丝绸之路群雕后,沿大庆路经沣惠路、劳动路至玉祥门。沿路穿越古城墙后沿莲湖路、西五路、东五路经北大街、解放路至朝阳门,穿越古城墙后,沿长乐路经康复路、西京医院、金花北路、万寿路,西行跨浐河后止于纺织城车站。线路全长  $24.95\text{km}$ ,设车站 17 座,其中换乘站有 4 座,车站位置如表 6.1 所示。远期规划西端延伸至咸阳市人民广场,长度约  $12.58\text{km}$ ;东端经洪庆延伸至临潼副中心,长约  $17.4\text{km}$ 。

表 6.1 一号线车站位置一览表

序号	站名	车站位置	备注
1	后围寨	后围寨立交北侧	
2	三桥镇	三桥路与建章路交叉口	与 5 号线换乘
3	阿房路	枣园西路与阿房路交叉口	
4	汉城路	枣园西路与汉城北路交叉口	
5	沣惠路	大庆路与沣惠北路交叉口	
6	劳动路	大庆路与劳动路交叉口	
7	玉祥门	大庆路与环城西路交叉口	
8	洒金桥	莲湖路与洒金桥路交叉口	
9	北大街	莲湖路与北大街交叉口	与 2 号线换乘
10	五路口	东西五路与解放路交叉口	与 4 号线换乘
11	朝阳门	环城东路与长乐路交叉口	
12	康复路	长乐路与康复路交叉口	
13	金花路	长乐路与金花路交叉口	
14	万寿路	长乐路与万寿路交叉口	
15	长乐坡	长乐路浐河开发区管委会西侧	
16	半坡	长乐路与半坡路交叉口	
17	纺织城	方北路与新寺路交叉口	与 6 号线换乘

该线路为城市东西向的主客流走廊，起骨架作用。线路起点后围寨为西安市对外交通的西大门，后围寨连接西宝高速、西兰公路、西户公路、快速干道、西宝高速疏导线等，是西安市西向对外交通枢纽；终点纺织城东向连接西潼高速、西潼公路、西蓝高速、西韩公路等，是西安市东向对外交通枢纽。线路连接西郊汉城路、玉祥门，城市中心北大街、解放路，东郊金花路、长乐路以及城区内城西客运站、西安客运站、康复路批发市场、长乐路客运站、半坡客运站等大型客流集散点和长途客运枢纽。一号线远期向西延伸至西安咸阳国际机场，向东延伸至临潼旅游度假区，可大大促进西安市旅游事业的发展及沿线土地开发利用，进一步加强西安作为国际级旅游城市的地位。对促进“西咸”一体化和西安旅游业的发展均具有重要作用。

## 6.2 西安市常规公交线网现状分析

西安市现状公交线网布局见图 6.2。西安市常规公交线网布局呈现明显的南北和东西十字轴向布设特点，尤其以南北轴线上的公交线网布设最为密集。西安市公交线路主要集中在明城墙区、太乙路地区、文艺路地区、东关地区、南关地区、太白路地区、劳动南路地区、红庙坡地区、北关地区、胡家庙地区、小寨地区等 11 个地区，其他地区公交网密度较小。即使在公交线网密度较大的 11 个地区内，由于线路重复系数大，线

路相对集中，实际覆盖面并不大，从而也体现了线路布局不够合理。西安公交线路网平均面积密度与《城市道路交通规划设计规范》标准相比，在中心市区公交线网密度应达到  $3\sim 4\text{km}/\text{km}^2$ ，在城市边缘区公交线网密度应达到  $2\sim 2.5\text{km}/\text{km}^2$  相比，西安城市公交线路网密度整体偏低。西安市现状公交客流断面如图 6.3 所示。

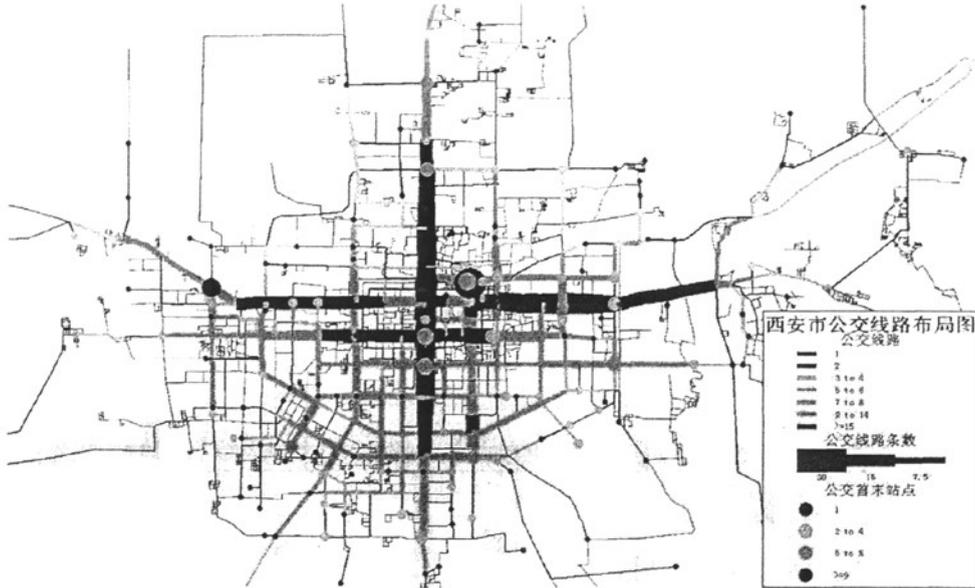


图 6.2 西安市公交线网布局图

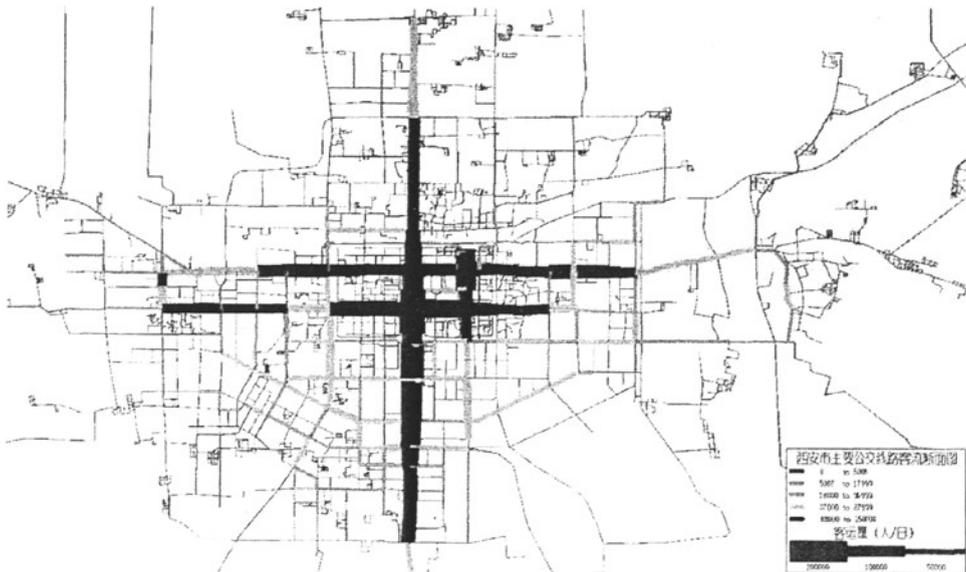


图 6.3 西安市现状公交客流断面图

### 6.2.1 地铁 1 号线站点直接吸引范围内常规公交现状分析

本文对地铁一号线直接吸引范围确定为：以一号线线位为中心，取垂直距离 750m

划出直接吸引范围。

目前,西安市共有公交线路 238 条,其中,与在一号线直接吸引范围内与一号线线位相关的公交线路有 182 条,占公交线路总数的 76.5%,总运营里程达到 3678.95km,配运营公交车 5243 辆,地铁一号线直接吸引范围内常规公交线路状况见附表 1。沿一号线线位东西向主干道路上的公交线路有 104 条,占公交线路总数的 44.3%,沿线共有公交站点 44 个<sup>[46]</sup>。各地铁站点区间段公交重复线路数量详见表 6.2。通过对地铁一号线走廊上高峰小时公交客流调查,得出地铁一号线走廊各断面公交高峰小时客流量,如图 6.4 所示。

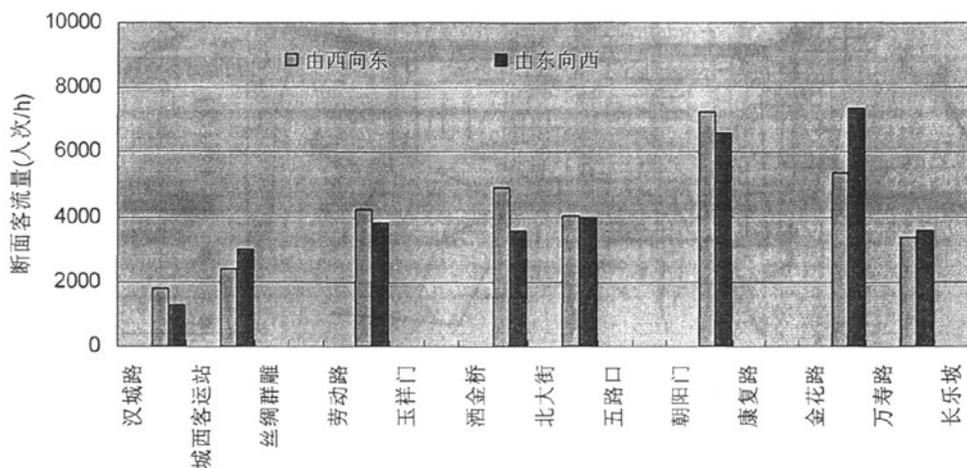


图 6.4 地

#### 铁一号线走廊各断面公交高峰小时客流量

从图 6.4 中可以看出,整个走廊各断面的公交客流量较大,从西向东方向的最大高峰小时断面客流达 7238 人/小时,从东向西方向,最大高峰小时断面公交客流达 7362 人/小时,客流断面较大的为朝阳门站点至康复路站点路段和金花路站点至万寿路站点路段,这两段都处于繁华商业区,客流吸引强度较大。



## 6.2.2 西安市地铁 1 号线客流预测分析

2016 年,建成运营的线路有 1 号线、2 号线,预计承担客运量 67.45 万人次/d,线网平均客流强度为 1.31 万人次/km·d。其中一号线客运量为 30.60 万人次/d。2016 年地铁 1 号线各站点全日站点流量如图 6.5 所示。2016 年轨道交通日客流图如图 6.6 所示。

2023 年全网承担客运量 220.92 万人次/d,全网平均客流强度为 2.31 万人次/km·d。其中一号线客运量为 74.19 万人次/d。

2038 年全网承担客运量 568.29 万人次/d,全网平均客流强度为 2.66 万人次/km·d。其中一号线客运量为 95.65 万人次/d。

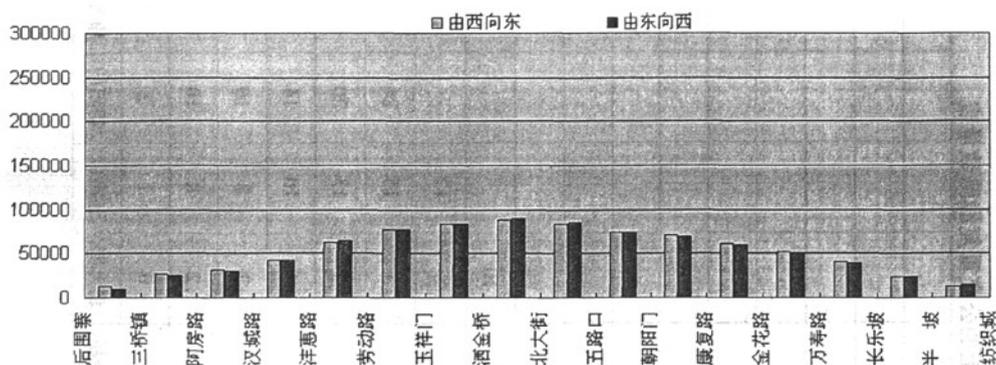


图 6.5 2016 年 1 号线各站点全日断面流量 (单位: 人次)

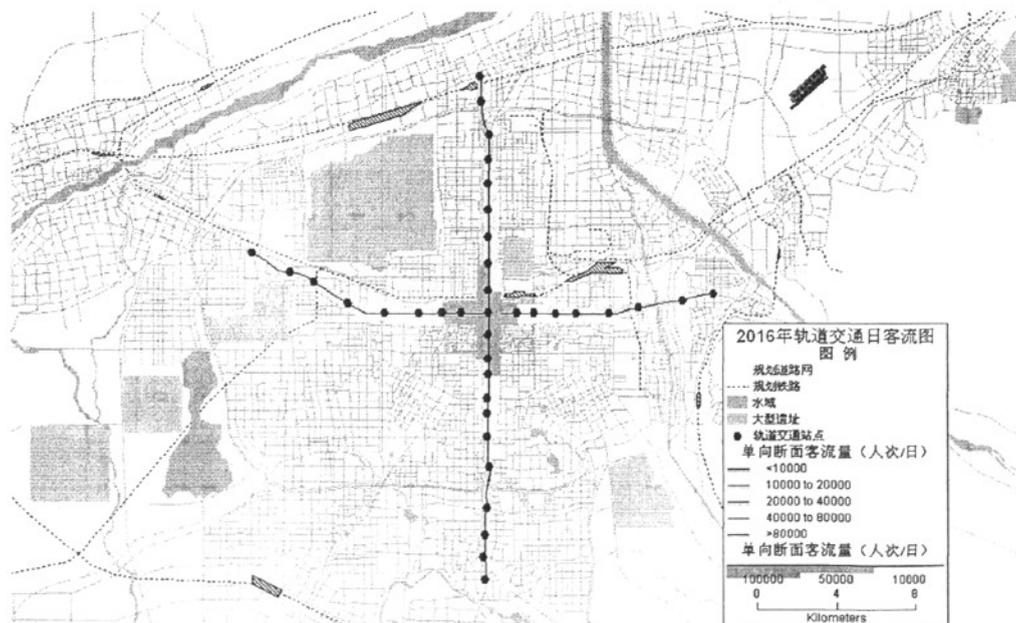


图 6.6 2016 年轨道交通日客流图

地铁一号线（后围寨~纺织城）设车站 17 座，线位横贯市区东西，西起西大门后围寨，途经三桥、城西客运站、沣惠路、玉祥门、北大街、五路口（西安火车站）、康复路、金花路等大型客流集散点，经半坡至终点纺织城。东西向拓展城市发展空间，并与地铁二号线在北大街相交构成十字架，起线网主骨架作用。为了进一步分析地铁一号线（后围寨~纺织城）客流的跨区域特点，将以地铁一号线（后围寨~纺织城）沿线划分为五个区域，即：西二环以西、西二环至环城西路、明城墙区域、环城东路至东二环、东二环以东。其中：

西二环以西：包含 4 个站点，即后围寨站、三桥镇站、阿房路站、汉城路站；

西二环至环城西路：包含 3 个站点，即沣惠路站、劳动路站、玉祥门站；

明城墙区域：包含 3 个站点，即洒金桥站、北大街站、五路口站；

环城东路至东二环：包含 3 个站点，即朝阳门站、康复路站、金花路站；

东二环以东：包含 4 个站点，即万寿路站、长乐坡站、半坡站、纺织城站。

地铁一号线初期（2016 年）大站全日 OD 分布图如图 6.7 所示，近期（2023 年）大站全日 OD 分布图如图 6.8 所示。地铁一号线初期（2016 年）各站点 OD 客流量见附表 2。

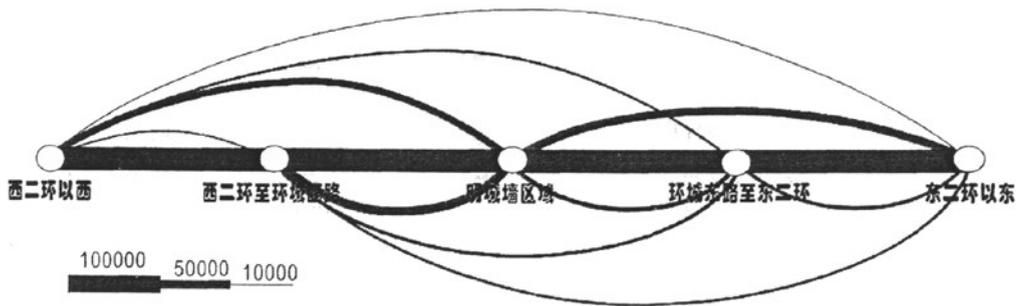


图 6.7 初期地铁一号线（后围寨~纺织城）大站全日 OD 分布

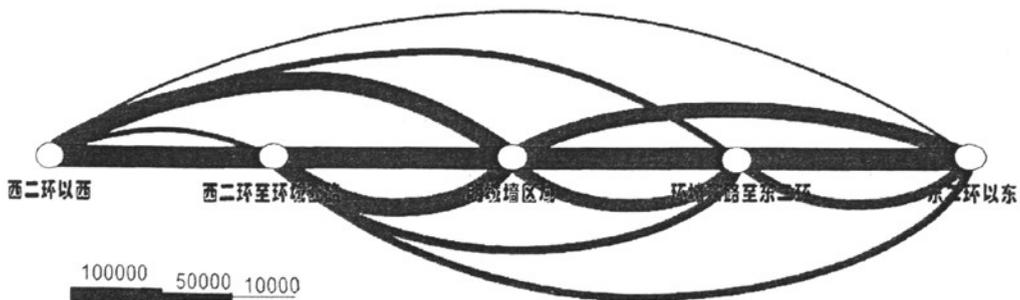


图 6.8 近期地铁一号线（后围寨~纺织城）大站全日 OD 分布

从以上图表中可以看出：

(1) 明城墙区域内各车站的平均乘降量负荷最高，远期高达 18 万人次/日；以明城墙为中心向两侧衰减。

(2) 从跨区域 OD 来看，主要的流量集中在明城墙区向外辐射的交换客流，以明城墙区域为起终点的客流约占总客流的 30%。

地铁一号线运营初期（2016 年）与地铁二号线在北大街站形成换乘关系，构成十字形网络。在公交优化调整中应注意北大街站点周围的常规公交线路。

### 6.3 常规公交线路优化调整建议及评价

#### 6.3.1 常规公交线路优化调整建议

在轨道交通客流确定的情况下，调整常规公交线路时，公交线路调整变化的首要表现为公交线路与地铁 1 号线重合长度和与地铁 1 号线交叉的公交线路条数的改变，继而导致线路重复系数和线路交叉系数的变化。公交线路的变化对各评价指标影响程度不同，且各指标之间也相互影响，具体如下表所示。

表 6.3 公交线路的变化对各评价指标影响

评价指标	假设 1	假设 2	假设 3
平均换乘时间（分钟）	增加	增加	增加
乘客换乘系数	增加	增加	增加
运能匹配程度	降低	增加	增加
营运协调程度	降低	增加	增加
线路重复系数	减小	—	减小
线路交叉系数（条/公里）	—	增加	增加
公交线网密度(km/km <sup>2</sup> )	降低	增加	降低
站点覆盖率（%）	不变	增加	不变

附注：假设 1：重合长度减少，但交叉线路条数不变；假设 2：交叉线路增多，但重合长度不变；假设 3：重合长度减少，交叉线路增多但不新增线路；

依据本文提出的常规公交线路调整规划原则及方法，基于对地铁 1 号线站点直接吸引范围内常规公交线网<sup>①</sup>分析和对地铁 1 号线客流预测结果<sup>②</sup>分析，从两个方面调整地铁 1 号线（近期）直接服务范围内的常规公交线路：（1）与 1 号线线位平行的公交线路调整；（2）与 1 号线线位相交叉的公交线路调整。考虑到时间和费用等因素，部分平行线路的客流可由地铁替代运输，部分交叉线路的客流可换乘地铁，以保障 1 号线对客流集散的需求与供给。本文提出两种调整方案进行评价比较，如表 6.4、6.5 所示。

表 6.4 地铁 1 号线直接吸引范围内常规公交线路网调整建议 (一)

序号	调整建议	调整原因	被调整的公交线路
1	保留	与 1 号线重合 1~3 个站点或与 1 号线线位交叉无重复站点	1、5、6、7、9、14、16、18、20、21、22、25、26、27、30、31、32、36、40、41、46、48、59、107、201、202、205、206、208、209、211、216、217、220、221、226、227、229、234、236、238、239、300、318(310)、336、351、402、405、409、410、500、501、508、509、510、521、525、600、k600、601、602、603、604、607、608、609、611、k631、700、705、706、707、709、717、723、900、907、游 4、游 6、游 7、游 8 (610)、五龙专线、通霄 2 号线、通霄 3 号线、二环 1 号线、二环 2 号线;
2	保留为接驳公交线路	以 1 号线线位上的公交站点为起讫点的向两侧辐射的中、长距离接驳公交线路	17、23、24、38、43、103、106、108、117、212、214、225、251、313、322、403、407、503、612;
3	保留	与 1 号线重合站点数较少 (大于 1) 或重合长度较短、公交站点间距较短, 方便短距离出行; 与 1 号线重合站点较多但相同走向线路少	4、9、13、28、33、47、50、118、203、207、210、213、213 区间、222、223、228、230、232、235、237、241、245、240、401、406、408、502、503、504、506、507、511、512、517、518、527、528、k605、606、k630、701、702、703、711、712、716、718、707、708、713、714、715、721、722、901、902、912、913、通霄 1 号线、通霄 4 号线;
4	截短线路, 调整为以地铁 1 号线站点为起讫点的接驳公交线路	与 1 号线重合站点较多且重合部分长度大于 4km, 相同走向公交线路较多, 相关地铁站点客流量大	12 路调整为: 地铁北大街站点至植物园, 保留段沿途停靠站点不变; 37 路调整为: 地铁北大街站点至康宁路, 保留段沿途停靠站点不变; K618 路调整为: 地铁北大街站点至红旗西站, 保留段沿途停靠站点不变; 102 路调整为: 地铁五路口站点至公园南路北口, 保留段沿途停靠站点不变; 118 路调整为: 地铁北大街站点至千户村, 保留段沿途停靠站点不变; 224 路调整为: 地铁玉祥门站点至曲江池调度站, 保留段沿途停靠站点不变; 704 路调整为: 地铁金花路站点至子午建材商场, 保留段沿途停靠站点不变; 710 路调整为: 地铁五路口站点至凤林绿洲, 保留段沿途停靠站点不变; 105 路调整为: 地铁半坡站点至水泥厂, 保留段沿途停靠站点不变; 104 路调整为: 地铁洒金桥站点至大明汽车配件城, 保留段沿途停靠站点不变; 10 路调整为: 西大新区至地铁玉祥门站点, 保留段沿途停靠站点不变; 15 路调整为: 昆明池路至地铁五路口站点, 保留段沿途停靠站点不变; 233 路调整为: 地铁半坡站点至水流, 保留段沿途停靠站点不变; 231 路调整为: 地铁纺织城站点至西核所, 保留段沿途停靠站点不变;
5	取消	与 1 号线站点完全重合或几乎完全重合, 且相同走向线路较多	11、301、303

表 6.5 地铁 1 号线直接吸引范围内常规公交线网调整建议 (二)

序号	调整建议	调整原因	被调整的公交线路
1	保留	与 1 号线重合 1~3 个站点或与 1 号线线位交叉无重复站点	1、5、6、7、9、14、16、18、20、21、22、25、26、27、30、31、32、36、40、41、46、48、59、107、201、202、205、206、208、209、211、216、217、220、221、226、227、229、234、236、238、239、300、318(310)、336、351、402、405、409、410、500、501、508、509、510、521、525、600、k600、601、602、603、604、607、608、609、611、k631、700、705、706、707、709、717、723、900、907、游 4、游 6、游 7、游 8 (610)、五龙专线、通宵 2 号线、通宵 3 号线、二环 1 号线、二环 2 号线;
2	保留为接运公交线路	以 1 号线线位上的公交站点为起讫点的向两侧辐射的中、长距离接运公交线路	17、23、24、38、43、106、108、117、212、214、225、251、313、322、403、407、503、612;
3	保留	与 1 号线重合站点数较少 (大于 1) 或重合长度较短、公交站间距较短, 方便短距离出行; 与 1 号线重合站点较多但相同走向线路少	9、13、28、33、118、203、207、210、213、223、228、230、235、237、245、240、408、502、503、504、506、507、512、517、518、527、528、606、k630、701、702、703、711、712、716、718、707、708、713、714、715、721、901、902、912、通宵 1 号线、通宵 4 号线;
4	截断线路, 增加以地铁 1 号线站点为起讫点的接运公交线路	线路本身较长, 向 1 号线线位两侧中、长距离辐射的公交线路, 与 1 号线重合站点较多且重合部分长度大于 4km, 重合站点客流量大	241 路调整为: 百襄建材市场至地铁金花路站点, 地铁半坡站点至西财行知学院, 保留段沿途停靠站点不变; 406 路调整为: 河止西至地铁金花路站点, 地铁半坡站点至常家湾, 保留段沿途停靠站点不变; 511 路调整为: 大白杨村至地铁五路站点, 地铁半坡站点至纺织城枣园小区, 保留段沿途停靠站点不变; 722 路调整为: 北陶至地铁三桥站点, 家世界至曲江城市花园, 保留段沿途停靠站点不变; 913 路调整为: 城北客运站至地铁金花路站点, 地铁半坡站点至鲸鱼沟, 保留段沿途停靠站点不变;

5	<p>截短线路，调整为以地铁1号线站点为起讫点的接驳公交线路</p>	<p>与1号线重合站点较多且重合部分长度大于4km，相同走向公交线路较多，相关地铁站点客流量大</p>	<p>4路调整为：桃园路至地铁北大街站点，保留段沿途停靠站点不变；          37路调整为：地铁北大街站点至康宁路，保留段沿途停靠站点不变；          K618路调整为：地铁北大街站点至红旗西站，保留段沿途停靠站点不变；          102路调整为：地铁五路口站点至公园南路北口，保留段沿途停靠站点不变；          12路调整为：地铁北大街站点至植物园，保留段沿途停靠站点不变；          50路调整为：地铁玉祥门站点至雅荷城市花园，保留段沿途停靠站点不变；          k605路调整为：地铁五路口站点至世家新城，保留段沿途停靠站点不变；          118路调整为：地铁北大街站点至千户村，保留段沿途停靠站点不变；          224路调整为：地铁玉祥门站点至曲江池调度站，保留段沿途停靠站点不变；          704路调整为：地铁金花路站点至子午建材商场，保留段沿途停靠站点不变；          710路调整为：地铁五路口站点至枫林绿洲，保留段沿途停靠站点不变；          47路调整为：地铁金花路站点至儿童福利院，保留段沿途停靠站点不变；          105路调整为：地铁半坡站点至水泥厂，保留段沿途停靠站点不变；          232路调整为：地铁纺织城站点至空工院，保留段沿途停靠站点不变；          222路调整为：文艺路至地铁沣惠路站点，保留段沿途停靠站点不变；          104路调整为：地铁洒金桥站点至大明汽车配件城，保留段沿途停靠站点不变；          10路调整为：西大新区至地铁玉祥门站点，保留段沿途停靠站点不变；          15路调整为：昆明池路至地铁五路口站点，保留段沿途停靠站点不变；          233路调整为：地铁半坡站点至水流，保留段沿途停靠站点不变；          213区间路调整为：地铁半坡站点至二炮学院，保留段沿途停靠站点不变；          401路调整为：地图金花路站点至西三爻，保留段沿途停靠站点不变；          231路调整为：地铁纺织城站点至西核所，保留段沿途停靠站点不变；          11, 103, 301, 303</p>
6	<p>取消</p>	<p>与1号线站点完全重合或几乎完全重合，且相同走向线路较多</p>	

## 6.3.2 常规公交优化调整评价

## (1) 评价指标值及其无量纲化

假设地铁1号线与常规公交重合区间段出行的原常规公交乘客，在公交线路调整之后全部转移到地铁1号线。根据第五章各评价指标的计算公式和方法 and 西安市地铁一号线客流预测结果，得出常规公交优化调整后各评价指标值，两个比较序列（两个调整方案）和参考序列的各项指标值如表 6.6 所示。

表 6.6 各评价指标计算结果

评价指标	方案一评 价值	方案二评 价值	参考序列 评价值	方案一无 量纲化	方案二无 量纲化	参考序列 无量纲化
平均换乘时 间(分)	2.36	2.8	2.36	0.94	1.12	0.94
乘客换乘系 数	1.15	1.26	1.15	0.97	1.06	0.97
营运协调程 度	85	90	100	0.93	0.98	1.09
运能匹配程 度	0.85	0.9	1	0.93	0.98	1.09
线路重复系 数	11.51	9.62	9.62	1.12	0.94	0.94
线路交叉系 数(条/公里)	3.23	4.32	4.32	0.82	1.09	1.09
公交线网密 度(km/km <sup>2</sup> )	2.81	2.75	3	0.98	0.96	1.05
站点覆盖率 (%)	90	90	100	0.96	0.96	1.07

## (2) 比较序列和参考序列的确定

方案评价指标形成两个比较序列：

$$C_1 = (0.94, 0.97, 0.93, 0.93, 1.12, 0.82, 0.98, 0.96)$$

$$C_2 = (1.12, 1.06, 0.98, 0.98, 0.94, 1.09, 0.96, 0.96)$$

利用公式 5.13~5.16 建立各评价指标的评估标准，即可得到参考序列  $C_0 = (0.94, 0.97, 1.09, 1.09, 0.94, 1.09, 1.05, 1.07)$ ，进而利用公式 5.17 进行指标的无量纲化，得到比较序列和参考序列各指标值，如上表所示。

## (3) 关联系数矩阵的计算

利用公式 5.18 求得关联系数矩阵  $\xi$ ：

$$\xi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.7778 & 0.7778 & 0.3333 & 0.3333 & 1 & 1 \\ 0.3333 & 0.3333 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.84 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 各评价指标权重的确定

根据 TL.Saaty 提出的 9 级标度法，确定判断矩阵如下：

A	平均换乘时间(B <sub>1</sub> )	乘客换乘系数(B <sub>2</sub> )	营运协调程度(B <sub>3</sub> )	运能匹配程度(B <sub>4</sub> )	线路重复系数(B <sub>5</sub> )	线路交叉系数(B <sub>6</sub> )	公交线网密度(B <sub>7</sub> )	站点覆盖率(B <sub>8</sub> )
平均换乘时间(B <sub>1</sub> )	1	2	2	2	2	2	2	2
乘客换乘系数(B <sub>2</sub> )	1/2	1	1	1/2	2	1	1/2	2
营运协调程度(B <sub>3</sub> )	1/2	1	1	1/2	1/2	1/2	1	1
运能匹配程度(B <sub>4</sub> )	1/2	2	2	1	2	2	2	1
线路重复系数(B <sub>5</sub> )	1/2	1/2	2	1/2	1	1/2	1/2	2
线路交叉系数(B <sub>6</sub> )	1/2	1	2	1/2	2	1	2	2
公交线网密度(B <sub>7</sub> )	1/2	2	1	1/2	2	1/2	1	2
站点覆盖率(B <sub>8</sub> )	1/2	1/2	1	1	1/2	1/2	1/2	1

矩阵经过归一化后，得到各指标权重：

$$W = (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8)^T$$

$$(0.1755, 0.1101, 0.0826, 0.1838, 0.0950, 0.1517, 0.1203, 0.0811)^T$$

最大特征值  $\lambda_{max} = 8.45$ ，则  $CI = \frac{\lambda_{max} - 8}{8 - 1} = 0.06$ 。

根据表 5.3,  $n=8$ ,  $RI=1.41$ ,  $CR=CI/RI=0.04 < 0.10$ ，则判断矩阵具有满意的一致性。

(3) 综合评价

利用公式 5.21、关联系数矩阵  $\xi$  以及各指标权重即可得到各方案灰色加权关联度为：

$$\gamma = (\gamma_1, \gamma_2) = (0.665, 0.796)$$

灰色加权关联度  $\gamma_i$  越接近于 1，表明方案  $A_i$  按照相应的评价规则，与评价基准的相似性越接近，方案效果就越好。根据灰色加权关联度计算结果，进行方案比较，根据表 5.4 评价指标标准，方案一可协调，方案二较强协调，方案二优于方案一，推荐方案二

为可选方案。但本文中两方案的灰色加权关联度都不是很接近于 1，还需要全面调整常规公交，制定效果更好的优化调整方案。

#### 6.4 小结

本章以地铁一号线直接服务范围内的常规公交线网为研究对象，进行实例分析，论证本文第四章的调整原则与方法。首先介绍了西安市轨道交通规划和地铁一号线的情况，并分析了地铁一号线直接服务范围内的常规公交线路；依据前述的常规公交线网调整优化原则与方法，对地铁一号线直接服务范围内的常规公交线路进行调整优化，并对优化方案进行评价。

## 结 论

本文在系统总结国内外城市轨道交通与常规公交协调研究与实践的基础上,对城市轨道交通与常规公交协调的基础理论与部分工作方法进行了研究。纵观全文,主要成果有:

(1) 对国外发达国家城市轨道交通与常规公交的协调研究和实践经验进行了总结,分析了我国城市轨道交通与常规公交协调领域中的研究成果,提出了城市轨道交通与常规公交协调的研究思路。

(2) 在对城市轨道交通和常规公交的技术、经济特征及其功能定位和城市轨道交通吸引范围进行分析的基础上,探讨了城市轨道交通与常规公交协调的内涵、特征,并在此基础上研究了城市轨道交通与常规公交协调模式。

(3) 在城市轨道交通换乘枢纽规划原则与目标的基础上,确定了城市轨道交通换乘枢纽等级。在分析站点分布影响因素的基础上,完善了以轨道线路系统总成本最小为优化目标的站间距优化模型。

(4) 分析了城市轨道交通与常规公交线网调整的必要性,总结了常规公交线网调整的目标和原则,在此基础上,提出了协调城市轨道交通的常规公交线网调整的理论和方法。

(5) 构建了城市轨道交通与常规公交协调评价指标体系,并对各指标进行量化。最后选用灰色关联度法进行综合评价。

(6) 以西安市地铁一号线(初期)直接服务范围内的常规公交线网为研究对象,对常规公交进行优化调整,并进行评价。

本文的主要创新点有:

(1) 应用 VF 程序模拟搜索方法求解以轨道线路系统总成本最小为优化目标的最优站间距,并系统应用轨道交通吸引范围,完善了最优站间距模型。

(2) 在公交 OD 客流方式划分和交通流分配的基础上,提出了协调城市轨道交通的常规公交线网调整的工作步骤,并结合调整原则进行优化调整。

(3) 构建了城市轨道交通与常规公交协调评价指标体系,并系统分析了重合长度、交叉线路条数的变化对各评价指标的影响。

城市轨道交通与常规公交的协调研究属于复杂大系统协调发展问题,涉及的因素很多且错综复杂,由于本人学识、精力、能力有限,尚未进行全面研究,存在一些未能彻

底解决的问题，需要进一步的研究和深化。具体有以下几方面：

（1）在实际应用以轨道线路系统总成本最小为优化目标的最优站间距模型时，只考虑了平均出行时间成本，没有考虑其他成本，还有待进一步完善。

（2）对城市轨道交通和常规公交的协调理论研究不够深入，有待进一步深化研究。

（3）城市轨道交通和常规公交协调评价指标体系有待进一步完善，各指标量化与取值范围有待进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 王海娟, 孙尧.对城市交通拥堵问题及其对策的思考[J].北京汽车, .2002, (2)
- [2] 孙章.加快发展以轨道交通为骨干的城市公共交通[J].城市轨道交通研究, 1998, (02)
- [3] 冈田宏. 东京城市轨道交通系统的规划、建设和管理[J]. 城市轨道交通研究, 2003, (03): 2-3
- [4] 蔡顺利.德国城市轨道交通概述—德国考察观感[J].城市交通, 2002, 4 (4): 33-35
- [5] 赵鑫.城市轨道交通与常规公交的协调研究[D].成都: 西南交通大学, 2006
- [6] 杨晓光, 周雪梅, 藏华.基于 ITS 环境的公共汽车交通换乘时间最短调度问题研究[J].系统工程, 2003, (2)
- [7] 陆锡明, 朱洪.《上海市城市交通白皮书》简介[J], 道路交通管理, 2002
- [8] 张 颖, 任福田等.北京城市自行车与公共交通换乘研究[J].中国公路学报, 1995
- [9] 晏克非等.广州市交通衔接方案改善[J].交通与运输, 2000, (6)
- [10] 覃煜,晏克非. 轨道交通与常规公交衔接系统分析[J]. 城市轨道交通研究, 2000, (02)
- [11] 姜帆.城市轨道交通与其它交通方式衔接的研究[J].北方交通大学学报,2001,25(4): 108-110
- [12] 袁振洲. 城市轨道交通规划与其它交通衔接问题的分析[J].科技导报, 2001, (11): 48-50
- [13] 覃煜、晏克非. 轨道交通枢纽换乘效率 DAE 非均一评价模型[J].长安大学学报(自然科学版), 2002, (04): 48-54
- [14] 王秋平、李峰. 城市其他客运交通换乘轨道交通协调探讨[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2003, (35) 2: 136-139
- [15] 孙俊. 轨道交通的无缝换乘规划[J].城市轨道交通, 2004, 26 (2): 22-24
- [16]. 王志臣. 城市轨道交通与市内交通的衔接规划研究[J].2005, 国防交通工程与技术, 2005, (4): 48-50
- [17] 谢玉洁, 韩宝明, 许惠花. 城市轨道交通与地面常规公交的客运一体化[J].都市快轨交通, 2006, 19 (1): 32-34
- [18] 陆化普, 朱军, 王建伟. 城市轨道交通规划的研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 50-70

- [19] 冯进峰,韩萍. 适应城市轨道交通建设的公交线网调整方法研究[A].城市轨道交通论文集(1999-2001) [C].北京: 中国铁道出版社, 2002:
- [20] 曹玫, 林小涵. 基于遗传算法的城市轨道交通接运公交线网规划[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29 (4): 568-570
- [21] 范海雁, 杨晓光, 夏晓梅等. 基于轨道交通的常规公交线网调整方法[J]. 城市轨道交通研究, 2005, 8 (04): 36-38
- [22] 姚德民, 李汉铃.系统工程使用教程[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996:
- [23] 王伟, 杨新苗, 陈学武等.城市公共交通系统规划方法与管理技术[M].北京: 科学出版社, 2002: 27,32-34
- [24] 中国城市规划设计研究院.北京城市轨道交通线网优化调整[R].2003
- [25] 王玉萍.常规公交与轨道交通之间的竞争与合作[D].西安: 长安大学, 2004: 39
- [26] Schumann.J.W. , What is New in NorthAmerican Light Rail Transit Projects?  
TRB(Transportation Research Board, USA)SpecialReport 221, 1989
- [27] 姚新虎.城市快速轨道交通与常规公交的线网协调研究[D].西安: 长安大学, 2006:  
13-15, 18
- [28] 曾珍香.可持续发展协调性分析[J].系统工程理论与实践, 2001, (3)
- [29] 顾培亮.系统分析与协调[M].天津: 天津大学出版社, 1998
- [30] 陈宽民等.西安市城市快速轨道交通线网规划[Z].西安: 长安大学, 2005
- [31] 中华人民共和国国家标准:城市道路交通规划设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1995
- [32] 张新军, 赵小琴.世界城市地铁与轻轨最新动态(2000~2001) [M].北京:中国铁道出版社,2001, 12
- [33] 朱蓓玲.合理确定地铁车站距离闭.铁道标准设计[J].1999, (3): 19-20
- [34] Murthy uA.Urban public transportation systems: implementing efficient urban transit systems and enhancing transit usage.proceedings of the First International Conference[C].Miami, Florida, USA.March 21-2, 1999
- [35] 何宁, 城市轨道交通规划系统分析[D].上海: 同济大学, 1996, 7
- [36] 叶霞飞, 顾保南.城市轨道交通规划与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- [37] 覃裔.轨道交通枢纽规划与设计理论研究[J].上海: 同济大学交通运输工程学院, 2002.6

- [38] 广州市中心区交通项目领导小组办公室.广州市交通衔接实施方案(最终报告)[z],上海同济大学道路与交通工程技术开发公司, 2000
- [39] 陈宽民等.西安市地铁一号线(后围寨~纺织城)工可阶段客流预测分析[Z]. 西安: 长安大学, 2008
- [40] 邵春福等.交通规划原理[M].北京: 中国铁道出版社, 2004: 165-166
- [41] 李琼星. 城市公交线网规划研究[D]. 长沙: 湖南大学, ,2002
- [42] 潘艳荣.轨道交通客流预测研究及 TransCAD 实现技术[D].重庆:重庆交通学院,2005
- [43] 招晓菊.城市轨道交通与常规公交协调换乘研究[D].长沙: 长沙理工大学, 2006
- [44] 陆化普, 王建伟, 李平等.城市交通管理评价体系[M].北京: 人民出版社, 2003.6:279-282
- [45] 铁道第一勘察设计院.西安市快速轨道交通线网建设规划[Z].2003.12
- [46] 陈宽民等. 西安市地铁一号线工程地面道路交通建设与管理方案研究[Z].2008

## 附录

## 附录一

## 基于乘客平均出行时间最小的最优站间距优化程序算法

```

&&函数 Fn
function f
parameters n,sun1
n1=0
lm1=lm^n
ex=exp(-lm)
n1=lm1*ex/jc(n)/sun1

return n1
endfunc

&&求阶乘
function jc
parameters n
y=1
for i=1 to n
y=y*i
endfor
return y
endfunc
&&计算函数

Dmax=val(alltrim(thisform.text11.value))
t1=0
sun=0
use zij
do while Dmin<Dmax
for n=1 to int(l/dmin)

lm=Laver/dmin
sun=0
for k=1 to int(l/dmin)
jc1=jc(k)
lm1=lm^k
ex=exp(-lm)
sun=sun+lm1*ex/jc1
endfor
f1=f(n,sun)

```

```

t1=t1+f1*[(b+Dmin/2)/Vj+(n-1)*s+ n*t5+n*(Dmin-Sa)/Vc]
endfor

repl  停站时间  with alltrim(thisform.text3.value)
repl  接驳      with alltrim(thisform.text2.value)
repl  加速度    with alltrim(thisform.text5.value)
repl  正常运行速  with alltrim(thisform.text4.value)
repl  平均乘行距  with alltrim(thisform.text8.value)
repl  站间距    with Dmin

repl  耗时      with t1

lm=0
sun=0
jc1=0
t1=0
Dmin=Dmin+10
enddo
thisform.text3.value=""
thisform.text4.value=""
thisform.text5.value=""
&&thisform.text8.value=""
thisform.text2.setfocus

保存结果
set talk off
use zjj
COPY TO e:\程序\111.xls TYPE XL5

```

附表1 地铁一号线直接服务范围内常规公交线路状况

重合公交站点数	线路	起点	终点	线路长度	配车数
1	5	紫薇城市花园	火车站	13.25	45
	6	怡园路北口	火车站西	17	20
	7	王家坟	西门	12.5	32
	9	邓家村	火车站	11	24
	14	科技路西口	火车站	15	50
	16	公交五公司	矿山路口	17	30
	18	城北客运站	城南客运站	16.5	30
	20	西铁局	金裕青青家园	13.5	36
	21	大唐芙蓉园南门	红庙坡	13.5	25
	22	金茂建材市场	曲江池调度站	17.3	30
	24	劳动路	大唐芙蓉园南门	13.7	25
	25	理工大曲江校区	火车站	10.5	13
	26	公交六公司西区	植物园	13	30
	27	植物园	辛家庙	18.5	28
	30	世家星城	火车站	11	35
	32	高新水晶岛	华清立交西	18	30
	36	煤矿机械厂	省肿瘤医院	21	44
	37	幸福路南口	城北客运站	17	38
	40	火车站	西辛庄	15.5	25
	41	铁设院	火车站	10.5	18
	46	大明宫建材家居城	明德门	14.9	43
	48	理工大曲江校区	金裕青青家园	13	22
	201	西辛庄	火车站	15.75	27
	205	紫薇城市花园	火车站西	15	45
	206	枫林绿洲西门	火车站西	14.5	30
	208	千户村	丰禾路	17.2	40
	209	金花北路	汉城商业街	13.5	22
	212	曲江池调度站	城西客运站	25.8	30
	214	长安大学渭水校区	长安大学	24.75	5
	216	大明宫建材家居城	特警支队	19	28
	217	邓家村	富力城	25.1	30
	220	阿姆瑞特家居中心	家世界	17.5	13
221	郭家村	延兴门	19.25	28	
225	城西客运站	吉祥村	16.7	32	
227	铁设院	西安出口加工区	25.25	16	
229	西京大学	火车站西	19	10	
236	未央湖	西华门	17.5	20	
238	现代农业开发区	西华门	30	24	
251	茶张村	火车站	16	16	

重合公交站点数	线路	起点	终点	线路长度	配车数
1	318 (原 310)	方新村北	车城花园	24	35
	313	万寿路	出口加工 B 区	24	45
	322	西安联合学院	劳动路	27.75	25
	336	西航花园	西华门	22	28
	351	马腾空	火车站	14.7	20
	402	高新一中	王家坟	16.5	28
	403	三桥	张家堡	16	12
	405	南门	斗门	32.5	34
	409	水泥厂	张家堡	21	30
	500	培华学院	火车站	20	27
	501	邓家村	曲江海洋世界	20.6	26
	508	唐都医院	白沙路	20.25	34
	509	太白小区	雅荷度假山庄	29.8	33
	521	秦阿房宫	交大科技园	22.8	30
	600	张家堡	陕师大长安校区	30	85
	k600	火车站西	外语大学南校区	24	20
	601	大唐芙蓉园南门	西安中学	20	33
	602	秦川一分厂	火车站	13	18
	603	金浮沱	火车站	14.5	45
	607	东月路公交停车场	火车站	13	18
	608	紫薇田园都市	火车站西	25	35
	609	经济技术开发区	大唐芙蓉园南门	16	35
	611	汉城路	火车站	11.5	60
	612	起重机厂	铁一中东校区	16.7	13
	K618	红旗西站	省肿瘤医院	18.5	25
	700	王家坟	高新一中	15.7	38
	705	大明汽车配件城	马腾空	26.5	40
	706	欧亚学院	陕汽总厂福利区	20.3	36
	707	丈八办	金裕青青家园	23.2	32
	717	月登阁村	青东村	21	36
	900	青东村	西万路口	25	25
	907	纺织城火车站	新合	31	25
	游 4	张家堡	汉阳陵	11.5	2
	游 6	火车站东广场	秦川一分厂	20.5	20
	游 7	火车站	西安职业技术学院	22.5	18
	游 8	大唐芙蓉园南门	赵村	22	30
	五龙专线	五龙国际车城	火车站	17	30
	通宵 2 号线	火车站	公交五公司	10.5	2
	通宵 3 号线	火车站	汉城路	12	2
	通宵 4 号线	钟楼	公交六公司	7.5	2

重合公交站点数	线路	起点	终点	线路长度	配车数
2	31	沔惠路	铁一中东校区	16.8	20
	59	咸阳火车站	西安汉城路	25	50
	107	茶张村	龙首东路	17.8	21
	202	西辛庄	经济技术开发区	17.5	40
	211	辛家庙西村	沙井村	22.5	18
	226	武警学院	郑家村	10.7	12
	234	汉城路	张家堡	21	12
	300	西辛庄	幸福路	19	48
	410	城南客运站	辛家庙	20	30
	510	西电医院	下水腰村	22.4	22
	525	出口加工B区	胡家庙新村	35.4	30
	604	外事学院北校区	金裕青青家园	25.2	28
	611	汉城路	火车站	11.5	60
	709	新房绿色家园	二零四所	25	40
	723	华山分厂	韩森寨	29.3	34
	k600	火车站西	外语大学南校区	24	20
	k631	城西客运站	金浮沱	24	33
	二环2号线	信号厂	信号厂	34	22
	二环1号线	金花北路	金花北路	34	21
	3~5	通宵1号线	西铁小区	起重机厂	17.9
1		西铁小区	起重机厂	17.9	20
2		金茂建材市场	特警支队	17.5	20
33		郭家村	经九路南段	16.8	20
43		电力医院	劳南市场	13.5	33
45		理工大曲江校区	家世界	14.1	35
108		凤城十二路	城西客运站	18.5	20
117		西安中学	五路口	9.75	11
118		千户村	桃园北路	17.75	22
203		东方大市场	明德门	18.9	45
210		城西客运站	明德门	15	38
228		公园南路南段	城市运动公园	19	40
235		青东村	东门	16.5	15
240		狄寨	火车站	21	35
408		欧亚学院	十里铺	26	42
502		东小寨	袁旗寨	25.5	30
503		武警学院	植物园	23.5	36
504		曲江池调度站	邓家村	25.1	30
506		电子正街	徐家堡	25.5	36
512		科技四路西段	火车东站	21.8	30
517	经九路	四零七库	18.6	30	

重合公交站点数	线路	起点	终点	线路长度	配车数
3~5	518	劳动南路	长安大学渭水校区	24	4
	527	劳教所	陕汽总厂	20.25	30
	528	千户村	安美居	17	26
	606	青龙寺	阿房一路西口	24	45
	702	阳光小区	河止西	21.7	34
	703	污水净化中心	新房村	24.8	36
	707	丈八办	金裕青青家园	23.2	32
	708	郭家村	史家湾村	1.8	32
	711	西安职业技术学院	红旗厂	26.1	34
	712	雁塔水泥公司	黄家坡	23.8	34
	713	世家星城	焦家村	27.9	39
	714	凤城十二路	白杨寨	28.7	32
	716	王家坟	比亚迪	28.8	40
	718	公交六公司西区	二炮学院	26	31
	721	公园中路	贺家寨	25	32
	912	世纪大道	万寿路北口	34.1	32
	k630	西安生物学院	胡家庙	20.5	35
	6~10	12	正义纺织公司	植物园	18
13		省电缆桥架厂	火车站	11	25
23		城西客运站	大唐芙蓉园南门	18	25
28		辛家庙	高新一中	21	23
38		幸福中路	城北客运站	13.5	30
47		五路口	儿童福利院	11.5	13
50		城西客运站	雅荷城市花园	16.8	22
102		公园南路北口	劳动路	11	25
106		法士特齿轮厂	电视塔	18.7	38
118		千户村	桃园北路	17.75	22
207		张家堡	沙井村	24	20
213		西核所	南门	26.5	10
223		六村堡工业园	西门	16.7	23
224		城西客运站	曲江池调度站	23	17
230		纺织城鹿塬街	城市运动公园	23.5	15
241		西财行知学院	百寰建材市场	23.5	15
406		常家湾	河止西	30	30
407		城西客运站	省射击场	21.8	22
701		安灵苑	西部车城	26.3	38
704		东方大市场	子午建材商城	27	36
710		枫林绿洲	万寿中路	23	36
722		曲江城市花园	北陶	35.8	32
913		鲸鱼沟	城北客运站	30	32

重合公交站点数	线路	起点	终点	线路长度	配车数
6~10	k605	万寿路	世家星城	18.8	34
11~15	4	万寿路	桃园路	15.3	35
	10	金花北路	西大新区	16.5	26
	15	水泥厂	昆明池路	22	45
	42	唐都医院	火车站	11.5	20
	103	汉城路	火车站	9.4	30
	104	城西客运站	大明汽车配件城	18.5	22
	105	水泥厂	火车站	12.5	25
	222	天台八路中段	文艺路	22	32
	232	空工院	南门	23.5	26
	233	水流	朝阳门	25.75	28
	237	大唐芙蓉园南门	武警五支队	27	30
	401	西三爻	唐都医院	24	30
	511	大白杨村	纺织城枣园小区	21	32
	715	园丁小区	春临村	25.8	36
	901	王寺工业园区	现代农业开发区	40	45
	902	比亚迪	安美居	34.2	36
	213 区间	二炮学院	南门	23.25	20
16~20	11	国棉五厂	南门	14.5	45
	231	西核所	八路军办事处	25.5	26
	507	西电医院	洪庆	28	30
≥20	301	三桥	灞桥	28	35
	303	城西客运站	万寿路	15.5	30

附表 2 2016 年全日站间 OD 表

OD	后围寨	三桥镇	阿房路	汉城路	洋惠路	劳动路	玉祥门	洒金桥	北大街	五路口	朝阳门	康复路	金花路	万寿路	长乐坡	半坡	纺织城	上车合计
后围寨	0	124	652	127	1628	598	967	992	2811	2027	508	407	721	285	46	44	86	12024
三桥镇	110	0	20	30	669	460	768	959	3539	2581	606	557	2895	343	666	90	470	14760
阿房路	515	24	0	26	417	414	304	450	1086	656	122	227	569	169	368	138	101	5588
汉城路	128	29	23	0	104	484	944	1046	3661	2474	647	462	1153	492	613	73	188	12520
洋惠路	1288	634	485	91	0	561	900	1642	6163	6466	1527	1264	1792	844	1496	319	584	26054
劳动路	451	479	417	419	609	0	494	1181	4565	2407	537	828	2907	685	1069	395	380	17822
玉祥门	766	683	304	1012	869	494	0	419	1162	1785	642	965	1475	910	1746	703	839	14775
洒金桥	843	961	433	1451	1671	1314	399	0	1872	1480	813	1139	2707	1120	1380	528	795	18907
北大街	1959	3126	967	3229	6956	4170	1470	1779	0	666	1605	3416	2251	2999	4079	1756	2874	43302
五路口	1726	3964	1265	2735	7045	2721	1639	1804	732	0	160	2221	583	1778	3316	1973	2104	35766
朝阳门	432	621	138	518	1396	638	800	837	1711	168	0	285	786	606	711	313	690	10651
康复路	308	551	272	486	1338	756	951	1318	3074	1904	324	0	94	254	733	329	545	13238
金花路	733	2633	512	1129	1948	3226	1596	2904	1917	601	917	89	0	1003	2213	2709	2548	26678
万寿路	224	320	198	453	865	628	1112	998	2732	2121	709	250	939	0	67	252	353	12221
长乐坡	73	546	382	571	1322	1062	1291	1335	3692	2767	845	779	1743	56	0	591	520	17573
半坡	31	79	134	70	249	377	696	525	1744	1857	369	318	2839	430	642	0	164	10523
纺织城	71	503	134	171	593	423	837	896	3516	2446	746	424	1864	308	552	139	0	13623
下车合计	9656	15279	6337	12517	27680	18324	15169	19086	43976	32404	11078	13631	25316	12282	19697	10351	13242	306025

## 攻读学位期间取得的研究成果

攻读硕士期间参与的主要科研项目：

- [1] 西安市城市综合交通改善工程（世行贷款项目）子项目：西安市明城墙区域旅游功能区自行车道工程可行性研究报告
- [2] 西安市地铁一号线（后围寨—纺织城）工可研阶段客流预测分析
- [3] 西安市地铁一号线工程地面道路交通建设与管理方案研究
- [4] 西安市地铁一号线工程地面道路交通管理与疏导分流方案研究
- [5] 后围寨——森林公园客流预测分析
- [6] 刘南村（A、B、C、D区）交通影响评价
- [7] 咸阳市综合交通规划
- [8] 2008年西安市居民出行调查

## 致 谢

本文是在尊敬的导师陈宽民教授的悉心指导下完成的。在论文的写作工程中，陈老师给予了精心的指导，并提出了大量宝贵意见。从师三年来，陈老师孜孜不倦的教诲、严格的要求，使我在学业上有了很大的提高。陈老师渊博的学识、严谨的治学态度、求实的工作作风和光明磊落的为人品格都使我受益匪浅。在此谨向陈老师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢！

同时，还要感谢在论文写作过程中给我帮助的马超群老师和罗小强博士！

此外，我还要感谢交通工程教研室的其他各位老师在我求学期间给予的关怀和指导。感谢在三年的学习和生活中，陪伴我成长的师兄师姐和师弟师妹们，从你们身上我获益良多！

感谢百忙之中评阅我论文的专家和教授！

在今后的工作和学习中，我将加倍的努力，以更丰硕的成果来答谢你们！