

1

2



Study on the Planning and Evaluation of Bus Network in

Dalian

A thesis Submitted to

Dalian Maritime University

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Engineering

by

Wang Yingjiao

(Transportation Planning and Management)

Thesis Supervisor: Professor Xie Xinlian

June 2011

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“大连市公路客运线网规划与评价研究”。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或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：王英娟

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 在 _____ 年解密后适用本授权书。

不保密 （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：

王英娟

导师签名：

[Signature]

日期：2011年6月25日

摘 要

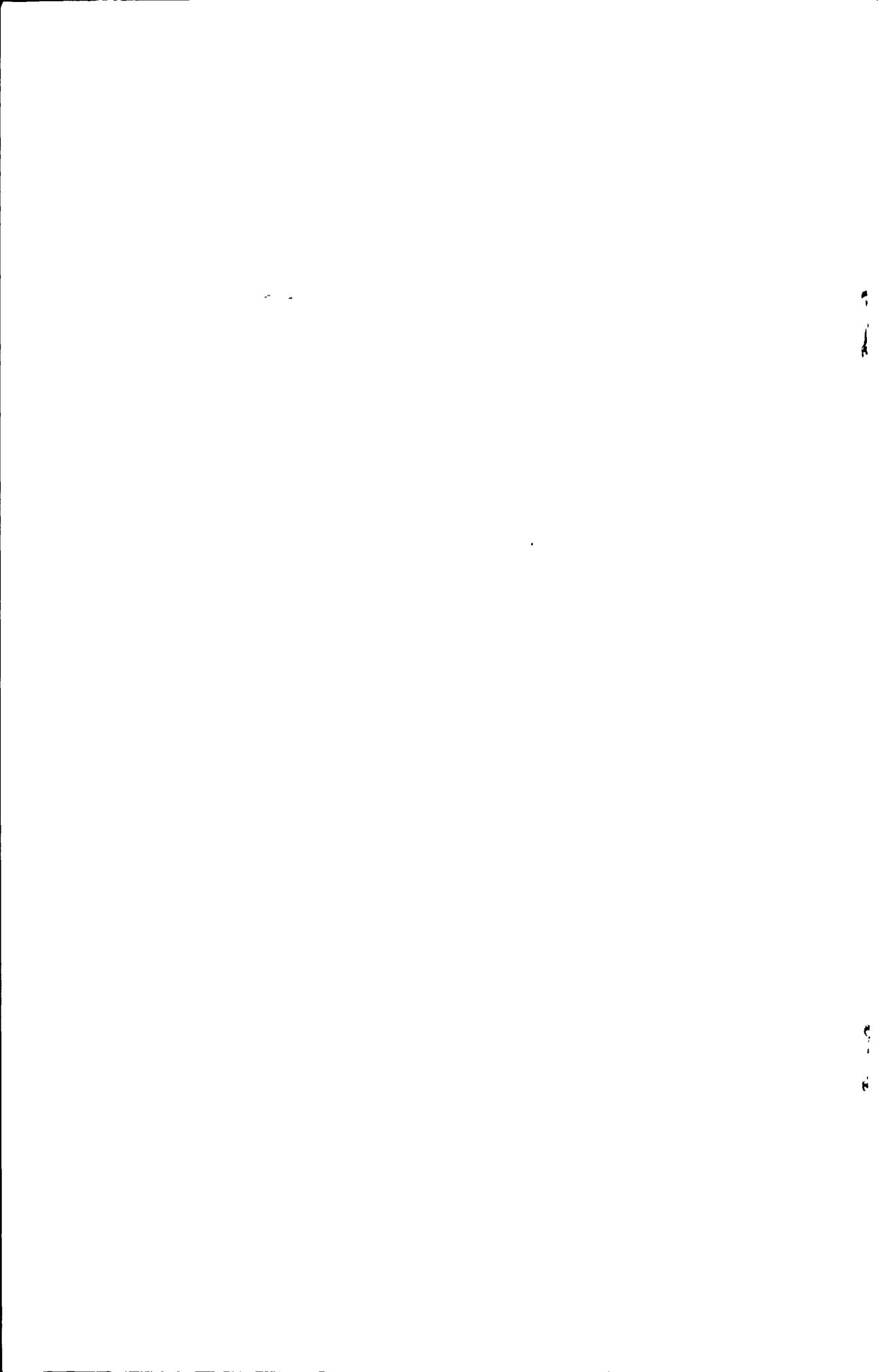
城市交通是城市社会经济发展的基础,是满足居民出行的前提。根据我国城市交通发展阶段,城市公路交通一直是实现旅客出行的重要手段,并且发挥的作用越来越大,是我国旅客运输中最主要、最基本的客运方式。实现“城市客运班线公交化”,“城乡客运一体化”,城市公路客运线网的优化已经成为我国城市道路客运规划的重要问题之一。

本文在多种客运方式相互竞争的条件下,建立了公路客运线网双层规划模型,并应用基于灵敏度分析的启发式算法进行求解,对公路客运线网进行规划。

首先,总结了国内外关于公路客运线网规划方法的研究成果;其次结合公路客运线网规划的特点,从协调客运企业与旅客之间的利益关系,达到客运系统效益最大角度出发,基于客运需求量和公路客运可行班线的确定,在多种客运方式相互竞争的条件下,建立了适合公路客运的客运线网双层规划模型。其中,上层模型为公路客运线网规划模型,以企业利润最大化为目标函数,下层模型为客运均衡配流模型,以旅客的广义出行费用最小为目标函数。再次,应用基于灵敏度分析的启发式算法对公路客运线网双层规划模型进行求解,求得公路客运线网优化结果。最后,以大连市公路客运主干线网规划为实例,通过计算机软件得到优化结果,并对结果进行评价,证明了公路客运线网双层规划模型的实用价值。

本文所建立的公路客运线网双层规划模型是可行的,优化求解方法也具有实用性。通过公路客运线网双层规划方法可以得到公路客运班线设置、最佳的班线班次和旅客最优票价,为公路客运线网优化和客运票价管理提供依据。

关键字: 客运班线; 双层模型; 均衡配流; 线网优化



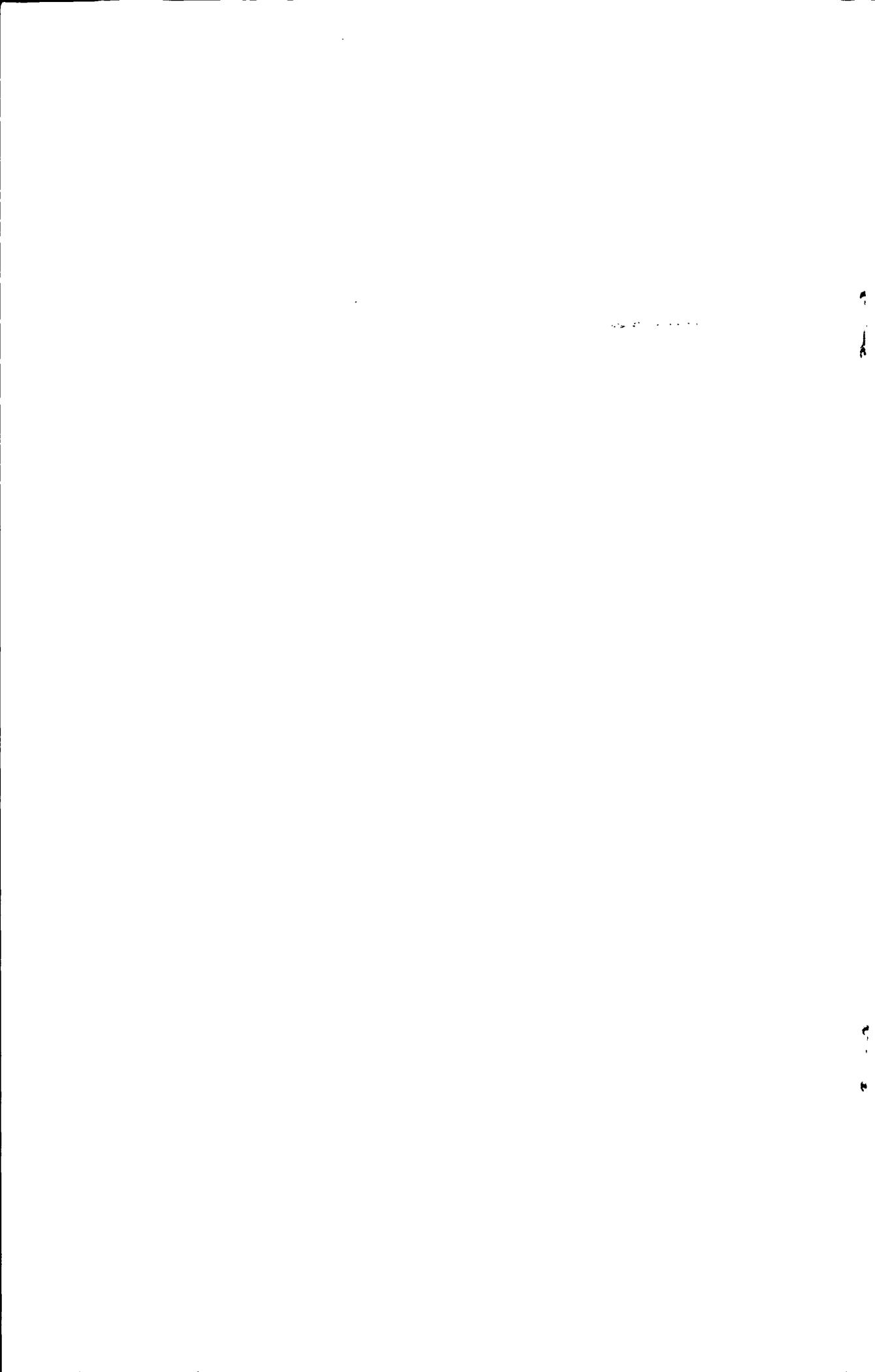
ABSTRACT

Urban transportation is the basis of urban social and economic development to satisfy citizen travelling. In our urban transportation development stage, the urban road traffic is still the most important and the most basic passenger way. The optimization of urban road passenger transportation planning has become one of important issues.

In this paper, under the condition of the passenger transportation way competing, establishes a highway passenger line nets bi-level programming model based on sensitivity analysis, and application of heuristic algorithm of highway passenger line network planning.

First, summary the passenger line nets planning method research and the characteristics of network planning. Secondly, for the largest passenger system benefits, based on passenger demand, under the condition of competition, establish highway passenger transport passenger line nets bi-level programming model. Among them, the upper model for highway passenger rail network planning, enterprise profit maximization model as target function and the lower model for passenger equilibrium assignment model, the passenger travel cost minimization as objective function. Third, solve line nets bi-level programming model for highway passenger transport based on sensitivity analysis of heuristic algorithm, achieve the line network optimization results. Finally, taking Dalian highway passenger transport for example, get optimized results through computer software, and prove the practical value of highway passenger line nets bi-level programming model, provide the basis for highway passenger line network optimization and passenger fares management.

Key Words: Passenger Transport Routes; Bi-level Model; Equilibrium Assignment; Network Optimization



目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论..... | 1 |
| 1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.2 国内外研究现状..... | 2 |
| 1.2.1 国外研究现状..... | 2 |
| 1.2.2 国内研究现状..... | 3 |
| 1.3 研究目标与内容..... | 4 |
| 1.4 研究意义..... | 6 |
| 第 2 章 公路客运线网规划概述..... | 7 |
| 2.1 公路客运相关因素分析..... | 7 |
| 2.1.1 公路客运班线定义及其分类..... | 7 |
| 2.1.2 公路客运票价与客流量关系分析..... | 8 |
| 2.1.3 公路客运企业与旅客关系分析..... | 8 |
| 2.2 公路客运线网规划特点..... | 9 |
| 2.3 公路客运线网规划原则..... | 10 |
| 第 3 章 公路客运线网双层规划模型..... | 11 |
| 3.1 公路客运线网规划依据..... | 11 |
| 3.1.1 公路客运线网规划思路..... | 11 |
| 3.1.2 公路客运线网规划步骤..... | 12 |
| 3.1.3 双层规划模型介绍..... | 12 |
| 3.2 客流量预测..... | 14 |
| 3.2.1 交通区域划分..... | 14 |
| 3.2.2 交通小区客运需求总量预测..... | 15 |
| 3.2.3 交通小区客流分布预测..... | 18 |
| 3.2.4 公路客运需求预测..... | 18 |
| 3.3 可行线路选择..... | 19 |
| 3.3.1 交通区域内客运线路起终点确定..... | 19 |
| 3.3.2 可行线路选择原则..... | 20 |
| 3.3.3 可行线路的确定..... | 20 |
| 3.4 公路客运线网规划模型设计..... | 21 |
| 3.4.1 模型建立的假设条件..... | 21 |
| 3.4.2 客运均衡配流模型..... | 22 |
| 3.4.3 公路客运线网双层规划模型..... | 24 |

| | |
|------------------------------|----|
| 3.5 公路客运线网规划模型求解 | 26 |
| 3.5.1 双层规划模型求解思路 | 26 |
| 3.5.2 客运均衡配流模型求解 | 27 |
| 3.5.3 公路客运线网双层规划模型求解 | 29 |
| 第 4 章 实例分析 | 31 |
| 4.1 大连市客运交通发展现状 | 31 |
| 4.1.1 大连市客运交通基础设施建设 | 31 |
| 4.1.2 大连市交通小区划分与小区客运情况 | 34 |
| 4.1.3 大连市公路客运主干线现状 | 36 |
| 4.2 大连市客运需求预测 | 37 |
| 4.3 大连市公路客运可行线路确定 | 37 |
| 4.4 大连市公路客运线网规划 | 38 |
| 4.4.1 基础数据准备 | 38 |
| 4.4.2 模型求解 | 40 |
| 4.5 优化结果评价 | 43 |
| 第 5 章 结论 | 45 |
| 参考文献 | 47 |
| 攻读学位期间发表论文 | 50 |
| 致谢 | 51 |

第1章 绪论

1.1 研究背景

随着我国社会经济的不断发展,公路客运作为综合客运体系的重要组成部分得到了较快的发展,公路基础设施不断完善,客运能力不断提高,旅客运输量快速增长,对国民经济和社会的发展发挥着重要的作用。在“十二五”规划^[1]中提出的道路运输工作的主要目标是“到2015年,形成城乡一体、衔接有序的道路客运服务体系。”“全面推进城乡客运一体化”作为“十二五”期间的道路客运的重要任务,包括两个方面:一是统筹区域与城乡客运资源配置,促进协调发展;二是加强与其他运输方式协同互动、优势互补。

城市交通是城市社会经济发展的基础,是满足居民出行的前提。对城市交通进行合理的规划,优化城市交通结构,达到各种交通资源有效组织和高效利用,是实现城市交通社会功能和经济促进作用的重要手段。城市公路、轨道交通、私家车等是城市交通的主要方式,根据我国城市交通发展阶段,城市公路交通仍然是实现旅客出行的重要手段,并且发挥的作用越来越大,是我国旅客运输中最主要、最基本的客运方式。

公路客运是“客运班线公交化”、“城乡客运一体化”发展的主体对象,公路客运线网科学系统的规划对旅客运输行业的发展具有重要的意义。随着社会经济的快速发展,城乡一体化进程的不断推进,城市规模的不断扩大,公路作为城市内部特别是城乡间的重要运输路径,旅客出行需求量不断增加,公路客运线网的规模、密度也不断增大。但我国公路客运线路的规划存在着很多问题,公路客运线路的规划跟不上公路网络基础设施的建设,公路客运企业追逐利益,客运资源配置失衡,严重制约着公路客运的发展。城市公路客运线网的优化已经成为我国城市道路客运规划的重要问题之一。

社会经济的不断发展,人民生活水平的提高,使得旅客出行需求量大幅增加,同时对运输服务的水平提出更高要求;城市化进程的加快,城乡一体化建设的推进,组团式城区的发展,旅客出行需求在结构上发生着变化。根据所提出的“十二五”道路客运的任务,加强公路客运与其他运输方式的协同合作,实现城市多

种客运方式的旅客出行综合费用最小，同时在综合运输系统中对公路客运线网进行规划，合理配置城乡公路客运资源，促进协调发展，实现企业与旅客的利益最大，是公路客运线网规划的重点。在城市与交通发展的新形势下，公路客运线网的规划是十分必要的。

1.2 国内外研究现状

公路客运线网优化是以城市公路网建设为基础，对公路客运线网进行规划。公路客运线网优化可以借鉴城市公交线网优化的方法，如客流的预测^[2]、发车频率的设定、运力配置^[3]、线网的生成研究等，以及规划模型的建立、模型的求解等^[4]。同时，公路客运又具有自身的特点，公路客运在客流、线路选择、票价设定、车辆的调配等方面与城市公交有一定的差别，人们的公路出行频率、公路线网与车辆的配置等相对于城市公交并不是十分的密集，因此在规划时没有城市公交线网规划中考虑的详细、复杂，但公路客线网的规划也具有独特性。公路客运一方面处于城市综合运输体系中，另一方面处于一个运输市场中，因此在对公路客运线网进行规划时，既要考虑到其他交通方式对公路客运的影响，又要考虑其在运输市场中的竞争关系。在对公路客运线网进行规划时，既要结合公路客运的自身特点，又要借鉴城市公交已有的先进的规划理论与方法，建立适合公路客运线网规划的方法。

1.2.1 国外研究现状

西方发达国家以私人小汽车为主，公共汽车为辅，因此国外研究主要集中在城市公交线网的规划。

国外对公交线网的优化始于20世纪的60年代，主要经历了经验法、系统分析法和多种理论规划方法三个阶段。城市公交线网优化问题主要包括线路的选择、发车频率的确定。近年来，随着研究的深入，公交线网的优化也包括了公交营运调度、票价制定、公交方式选择等的研究。

20世纪60年代初，由于科技发展水平的限制，公交线网规划主要采用经验法，包括自然演变法和权威定线法两种形式。

20世纪60年代末到80年代初，随着运筹学以及系统工程学的发展，公交线

网的规划主要应用运筹学的理论,采用系统分析的方法,以公交线网某一优化目标为目标函数建立模型,进行线网的优化。代表性的有 Ceder 和 Wilson 同时考虑了乘客和经营者的利益,将线网规划分成五步,并给出设计新线路的一种算法^[5]; Lampkin 等将乘客舒适度与出行时间作为公交线网规划的目标函数,建立了一个网络设计模型,对未来公交网络规划的 TRANSEPT 软件包的研究奠定基础^[6]; Hirsch 等在固定费用的基础上,将公交网络优化模型设计成一个固定需求模型^[7]。

20 世纪 80 年代至今,公交网络规划的研究进入了高潮,各种规划方法得到应用,并与计算机结合,在模型的建立与求解方面更加的容易。模型的求解采用了遗传算法、蚁群算法、遗传退火法、神经网络法等先进的技术。Pattnaki 以综合费用最小为目标函数,在生成的可行线路中,通过遗传算法求解模型进行线路的优选^[8]。对于双层模型的求解结合了遗传算法、蚁群算法、退火算法等多种算法。Baaj 和 Manhmassani 运用人工智能算法和运筹学混合算法,将人工智能算法中路径搜索的启发式算法和系统分析方法结合,建立人工智能的线网优化方案^[9]。Sullivan 等基于 GIS 系统,提出了一种公交最佳路径选择的分析方法^[10]。

1.2.2 国内研究现状

国内经济发展水平以及公路网发达,公路客运占很大一部分。但公路客运线网规划研究主要借鉴城市公交网络规划方法。国内对城市公交网络进行优化方法如下,王志栋提出了多目标公交网络优化模型,但这种模型是无法求解的^[11];王炜提出了“逐条布线,优化成网”的公交线路优化方法,以直达客流最大为目标函数建立线性优化模型^[12];林柏梁等以乘客的出行时间最短和公交网络的资金投入最少为目标函数,提出了公交网络优化设计的非线性 0—1 规划模型^[13];韩印等对智能化调度的公交网络优化模型建立,并用遗传算法进行求解^[14];杨忠振等以直达客流量最大为优化目标,建立了公交线网的优化模型,并用蚁群算法进行了求解^[15];高自友等从动态的客流需求角度,建立了双层规划模型,并应用遗传算法进行求解,对城市公交网络双层规划模型进行了深入的研究^[16-21]。国内的公交网络优化方法借鉴了国外在优化思路、模型建立、求解等方面的成果,同时结合了国内公交客运的特点,提出了适合我国城市公交网络优化的方法。

公路客运线路网规划与城市公交网络规划有存在不同之处,城市公交网络规

划主要解决的是满足出行需求和城市交通拥挤问题，而公路客运线网规划主要是在保证企业经营利益的前提下满足旅客出行需求。公路客运线路规划主要包括线路选择、车辆的配置、班线配置、发班次数等。令狐燕等以公路旅客出行时间最短为目标函数，建立优化模型，对公路客运线路发车班站点的定量优选进行研究^[22]；凡亚军等以出行时间最短和营运费用最小为目标建立了公路客运线网优化模型，并应用遗传算法进行求解，对公路客运班线设定、班线车辆配置、班次确定等进行规划^[23]；龚国清等考虑运输市场中变动的公路客流，应用双层规划模型对道路客运班线运力规划进行研究^[24]。其中，上层规划模型采用高自友教授所研究的多种运输方式之间的竞争配流，得到公路客运流量变动规律代入下层模型，下层模型是对公路客运不同的客运方式运力的配置进行规划研究。

本文主要借鉴高自友教授的关于各种运输方式的客运流量配置分析以及谢新连教授的公路客运线网线性优化方法^[25]，采用双层规划方法对公路客运网络进行规划。

1.3 研究目标与内容

公路客运线网规划包括公路客运站规划、公路客运班线配置、公路客运班线优化等、公路客运班线运营管理等，本文主要研究公路客运班线的优化。公路客运班线的优化主要是指新班线的设置、现有班线的改进、班次的设定、路网运力配置等。

在综合运输系统中，根据客运需求对公路客运线网进行科学系统规划，在满足客运需求的前提下实现客运资源的进行合理配置，对我国现阶段公路旅客运输业的发展具有重要的意义。在满足公路运输企业经营利润最大化的前提下，以方便、快捷、舒适、安全的客运方式满足公路旅客出行的需求，同时使旅客广义出行费用最小，如何协调这两方面问题是实现公路客运社会效益的关键。

本文采用了“先布线，后优化”的方法对公路客运线网进行优化^[12]。首先介绍了研究背景，总结了国内外关于公路客运线网规划的研究现状；其次根据公路客运线网规划的相关因素和特点，从旅客和企业利益最大角度出发，基于客运需求预测和公路客运可行班线网的确定，建立适合于公路客运线网的双层规划模型。上层模型以公路客运需求为依据，以公路客运企业利润最大化为目标，在满足客

运需求的前提下对公路客运班线进行合理规划。下层模型以公路客运市场分析为基础，以综合客运系统中旅客广义出行费用最小为目标，建立了客运方式客流均衡模型，对未来公路客运需求量进行预测，为上层规划模型提供依据。再次，通过基于灵敏度分析的启发式算法对公路客运线网双层规划模型进行求解。最后，以大连市公路主线客运线网规划为实例，通过计算机软件得到优化结果，并对结果进行评价，证明了公路客运线网双层规划的实用价值。

对公路客运班线进行科学系统的规划，使公路客运方式在综合客运系统中实现客运资源的合理利用，满足城乡客运需求，实现公路客运企业利润最大和旅客广义出行费用最小，这是本文研究的目标。本文研究的技术路线如图 1.1:

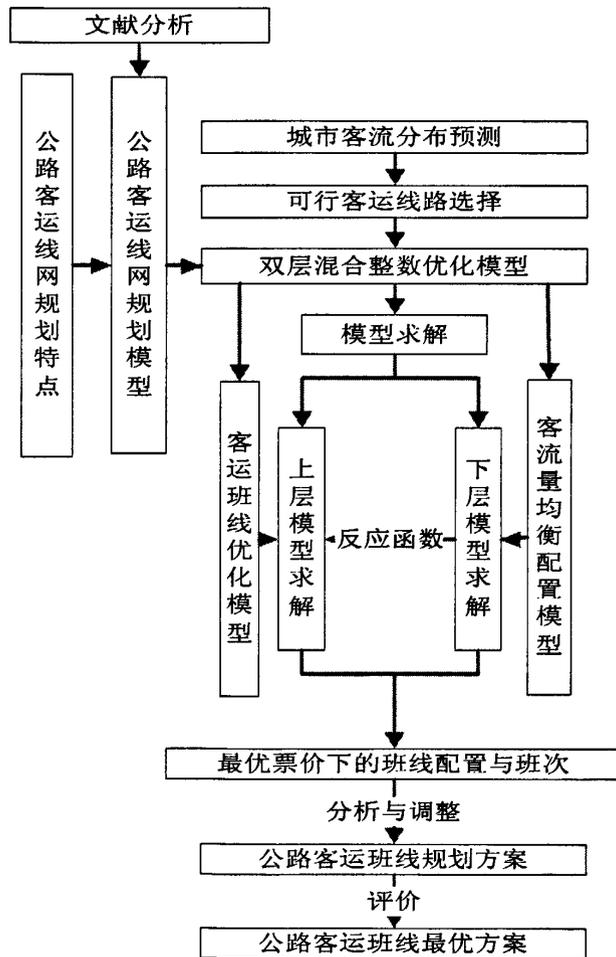


图 1.1 研究技术路线图

Fig.1.1 Flow chart of this research

1.4 研究意义

随着我国社会经济的不断发展，公路客运作为综合客运体系的重要组成部分得到了较快的发展，公路基础设施不断完善，客运能力不断提高，旅客运输量快速增长，对国民经济和社会的发展发挥着重要的作用。

在城市客运交通体系中，城市公路客运是重要的组成部分。随着城市社会经济的不断发展，城市规模的不断扩大，城市公路客运资源的有效组织和高效利用，对实现城市公路客运社会功能和经济发展起着积极的促进作用。公路客运是“客运班线公交化”、“城乡客运一体化”发展的主体对象，公路客运班线的科学合理的规划为实现“城乡客运一体化”、“客运班线公交化”目标奠定基础，对城市道路客运的发展具有重要的意义。

公路客运班线缺乏系统的规划，线路长度过短或过长，线路分布不均匀，运力资源配置不均衡，无法满足旅客的出行需求。公路客运班线布局不合理，公路客运资源配置不均衡，造成运力浪费，部分区域运力紧张，客运车辆营运效率减小，损害公路客运企业经营利益。

科学系统地对公路客运线网进行规划，合理配置客运资源，可以充分发挥公路旅客运输优势，增加企业营运和旅客出行的效益。对城市公路客运线网进行优化，可以提高线网运营效率，减少换乘次数，方便城乡旅客出行；可以提高道路利用率、车辆实载率，增加公路客运企业利润。同时，也可以帮助政府部门从宏观上调控客运线路的布设和运力的分配。

第2章 公路客运线网规划概述

公路客运线网规划包括公路网分析、客流量预测、运输成本与票价计算、班车线网设计、班线运力配置、客运站班线配置等。在对公路客运线网进行优化之前,应该对其相关的因素进行分析,明确规划对象、优化原则等。公路客运涉及的相关概念有公路客运班线定义及其分类等,相关的因素包括客运方式替代分析、客运票价、客流量等。

2.1 公路客运相关因素分析

2.1.1 公路客运班线定义及其分类

本文对公路客运线网优化结果包括客运班线的设置和班线班次的设定,优化的对象为客运班线,因此这里具体介绍客运班线的定义与分类。

公路客运线路可分为班车线路和旅游线路等,本文主要研究班车线路。班车客运^[26]是公路客运最基本、最重要的公路客运方式,班车客运是指营运客车在地区之间(包括了城市、城镇、乡镇之间)按照规定的线路(通路、运输线路)、站点、班次运行的一种客运方式,由线路、班次、站点、车辆、其他运营管理方法等构成。公路客运班车线路是公路班车客运方式的重要组成部分,不仅包括公路客运车辆的运行路径,而且包括具体的客运组织形式,以“班次”来体现。

公路客运班线是指公路客运班车的运行路径,以及旅客运输的组织方式,它是客运企业进行旅客运输的经济凭证。包括线路、站点、班次三个基本组成要素。

目前,根据道路旅客运输及客运站管理的规定,公路客运班线按照公路客运经营区域和营运线路长度的不同划分为以下四类^[27]:

一类客运班线:指地区所在地与地区所在地之间的客运班线或营运线路长度在800公里以上的客运班线;

二类客运班线:指地区所在地与县之间的客运班线;

三类客运班线:指非毗邻县之间的客运班线;

四类客运班线:指毗邻县之间的客运班线或县境内的客运班线。

客运班线作为旅客运输组织的一种形式,还可以根据客运的组织形式和旅客运输的特点等进行分类。按客运服务模式不同分为普通客运班线和快速客运班线

两种；按旅客运输过程是否中转，是否存在中间站点可分为直达班线和非直达班线两种；按客运班线起终点不同可分为省内班线、省际班线两种。

2.1.2 公路客运票价与客流量关系分析

客运需求量是进行公路客运线网规划的主要依据，公路客运运力的配置就是要满足旅客的出行需求。在客运市场中，某种运输方式所承担的旅客流量又受到这种运输方式的票价、运输时间、服务水平的影响^[28]。相对来说客运票价的变化对公路客流需求变化的影响是最主要的。在客运市场中，如何协调客流需求与票价之间的关系，是使客运需求在各种客运方式之间进行均衡分配，达到旅客广义出行费用最小的关键。

公路旅客运输处于整个客运市场中，在客运市场中各种运输方式的票价、客流量、服务水平等因素相互作用、相互影响。因此公路客流量、票价等相关因素应该在整个客运市场中进行考虑。假设每种客运方式的运力均能满足客运需求，在客运市场中，旅客根据票价、旅行时间、舒适度、安全性等对客运方式进行选择，客流量在客运方式中进行分配，最终达到均衡稳定状态，此时，旅客选择的各各种客运方式广义出行费用最小，并且相等。当旅行时间、舒适度、安全性等因素不变时，某种客运方式的票价发生变化，旅客会对所有的运输方式进行重新选择，客流量发生转移，重新分配，形成新的用户均衡状态。通过分析可知，当旅行时间、舒适度、安全性等因素不变时，票价与用户均衡状态是一一对应的，可以表示为：

$$(P_1, P_2, \dots, P_m, q) \quad (2.1)$$

其中， P_i 为第 i 中客运方式的票价； $q \in Q$ ， Q 为均衡状态集合； q 为某一票价下，所有已选客运方式的客流量。

2.1.3 公路客运企业与旅客关系分析

公路客运涉及两个主体，公路客运企业和旅客，两者相互作用又相互矛盾^[28]。

一方面，公路客运企业可以通过对公路客运服务相关因素的调整来吸引客流，如客运票价、时间、服务水平等。其中，在市场经济条件下客运票价起着主要的作用；另一方面，在各种客运方式的票价、时间、服务水平等因素确定时，旅客会选择最佳的出行方式，实现旅客出行费用最小、时间最短的目的。

第3章 公路客运线网双层规划模型

3.1 公路客运线网规划依据

3.1.1 公路客运线网规划思路

本文是在多种客运方式相互竞争的条件下,建立了公路客运线网双层规划模型^{[18][23]},对公路客运线网进行规划。这种竞争主要体现在市场条件下,各种客运方式运输旅客的多少,即各种客运方式所承担的客运量。当公路客运方式所承担的客流量确定后,再进行公路客运线路规划,对公路客运班线进行设置、确定班线班次等,完善道路旅客集疏运网络,科学安排班次密度,实现合理配置客运资源,满足客运需求的目的。

公路客运线网的规划思路是:首先确定公路客运的可行班线网络,以班线的客运需求为依据,分别通过客运线网优化模型进行优化,最后对优化结果进行评价,得到公路客运线网最优方案。

文章的主体是线网规划模型的建立及求解。根据对公路客运相关因素的分析,为实现公路客运企业利润最大化,旅客广义出行费用最小的目标,协调客运企业与旅客之间的利益关系,制定合理票价和线网规划,达到客运系统效益最大化,因此,本文应用双层规划模型对公路客运线网进行规划。其中,上层模型为公路客运线网规划模型,以企业利润最大化为目标函数,下层模型为客运均衡配流模型,以旅客的广义出行费用最小为目标函数。公路客运企业通过票价的制定影响旅客对不同客运方式的选择,公路客流进行分配达到均衡,上层线网规划模型依据均衡配流模型得到的公路客运需求量,最终确定公路客运线网优化结果。

模型的求解参考交通网络设计双层规划模型求解算法^{[16][18][29]},应用基于灵敏度分析方法的启发式算法对模型进行求解。首先是对下层客运均衡配流模型进行求解,针对某一初始票价对下层模型进行求解,得到各种客运方式初始客流量,再应用灵敏度分析方法求得旅客对某种客运方式的客运需求量对旅客票价的导数,应用泰勒一阶展开式将客运需求量与旅客票价近似表达为线性函数关系,将关系式代入上层客运线网规划模型,使其转化为一个普通的非线性规划问题,应用已有算法进行求解,得到新的票价和该票价下的公路客运规划方案;再将新的

票价代入下层模型，求出新的客运需求量代入上层模型，如此重复，直到上层规划模型的解收敛于原双层规划模型的解，得到公路客运班线设置、最佳班线班次和旅客最优票价，为公路客运线网优化和客运票价管理提供依据。

3.1.2 公路客运线网规划步骤

公路客运线网规划的具体步骤为：

(1) 客流量预测

客运需求量是进行公路客运线网规划的依据。客流量预测包括客运需求总量预测和分布预测，是进行可行班线网的确定以及线网优化的基础。本文应用城市交通的“四阶段”法的相关理论对客流分布进行预测^[30]，首先进行交通区域划分，进行交通基础数据的调查，得到现状年客流量，然后应用组合预测方法^{[31][33]}得到客运需求总量，再应用重力模型法对客流分布进行预测。对于公路客流量预测，本文基于客流分布预测，应用均衡配流模型进行了动态的预测。

(2) 可行班线网的确定

本文采用“先布线，后优化”的方法，在可行班线网确定后，在应用双层规划模型进行优化。可行班线的确定综合应用了定向和定量两种方法。

(3) 模型优化

结合公路客运线网规划特点，建立客运线网双层规划模型，应用基于灵敏度分析的启发式算法进行求解，对线网进行优化。

(4) 优化结果评价

结合客运线网实际情况，对优化结果进行评价，对优化后的公路客运线网进行适当调整。

(5) 得到最优规划方案

其中，客运线网双层模型的建立以及算法求解是本文的研究重点。

3.1.3 双层规划模型介绍

双层规划方法在交通网络设计中的应用开始于20世纪90年代，Friesz(1985)、Magnanti和Wong(1984)、Boyce(1984)、Yang(1988、2001)等人相继用双层规划模型和算法对城市交通规划问题进行研究，如交通网络设计、交通需求预测及城市交通信号控制等问题。

公路客运企业是运输服务的提供者，旅客是客运服务的需求者，两者有各自追求的目标和所要达到的要求。在客运线网优化过程中，主要考虑协调这两方面的利益。公路客运企业是以营运利润最大化为目标，而旅客希望以经济的方式、最短的时间，舒适、安全地到达目的地，两者之间存在着矛盾。如何协调公路客运企业与旅客之间的客运供需关系，合理配置公路客运资源，满足客运需求，是本文客运线网规划的目的。

2.2 公路客运线网规划特点

城市公路客运班线作为城市公共交通的客运组织形式，它的规划可以借鉴城市公交线网规划方法，但由于其线网、班线、经营方式、管理模式等与城市公交有所不同，公路客运线网规划有其自身的特点。

(1) 公路网是布设客运线网的基础，公路网的相关因素影响公路客运线网的路径的设置；

(2) 公路客运相关因素较多，不仅受到客运需求的影响，而且受到公路客运管理部门、公路客运企业等的影响，客运班线的投资、客运的收益等因素对客运线网的建设有很大影响；

(3) 根据市场供需关系，客运需求是公路客运线网优化的依据。同时，在客运市场中，公路客运需求量受到其他客运方式的影响，与其他客运方式存在竞争关系，主要表现在公路客运需求量随各种客运方式的票价变化而变化；

(4) 公路客运企业有充分的运能，能够满足旅客运输需求；

(5) 公路客运交通受道路拥挤程度的影响很小，旅客出行时可以不考虑客运路径车流量的大小；

(6) 随着公路客运班线公交化，城乡客运一体化的发展，公路客运作为一种过渡的客运方式，其规划对未来客运体系的发展有着重要的意义。

随着城市面积的不断扩大，卫星城市的建立，公路网的建设，公路客运逐渐向城郊、城际公交发展。地铁、轻轨等成为城市远距离客运最佳方式，但由于其成本高，在城市公共交通没有达到一定发展水平，轨道交通处于建设或起运阶段，只能承担近距离小部分的客流。另外城市公共交通处于完善阶段，公路客运逐渐向公交化、城乡化发展，公路客运仍将在中小城市的中远距离运输中占有优势地

位，城市公路客运线网规划具有重要的意义。本文重点结合公路客运的运作模式、线路选择的特点对公路客运线网进行规划。

2.3 公路客运线网规划原则

公路客运处于城市系统中，是城市交通系统的一部分。公路客运线网布局的合理性，将会影响到城市的发展以及城市布局规划，影响到城市城乡居民的出行。公路客运线网的规划必须结合城市发展的实际情况，遵循一定的城市交通规划要求与原则。

(1) 适应性原则

公路客运线网是城市总体布局规划的一部分，作为城市客运交通系统的一部分与城市总体布局相互影响。同时，城市交通的发展，基础设施建设、运输组织以及线网规划合理，对城市经济发展具有拉动作用，客运线网的规划是为了更好地满足城乡旅客的出行需求。因此，城市公路客运线网的规划应该与城市总体布局、城市发展方向以及城乡客运需求相适应。

(2) 协调性原则

城市公路客运网络作为城市交通系统的重要组成部分，是满足城乡客运需求的主要交通方式。公路客运方式与其他城市旅客运输方式之间既存在着对客流量的竞争关系，又存在着合作关系，共同满足旅客出行。为了更好地满足城乡旅客出行需求，公路客运线网的规划应该与其他客运方式的线网建设、运输组织、运营管理相协调。另外，公路网建设是公路客运的基础，公路客运线网的规划应与城市公路网以及其他公路客运基础设施的建设与发展情况相协调。

(3) 超前性原则

客运线网的规划主要是以未来旅客出行需求为依据，结合城市建设、经济发展方向、人口规模与分布等。客运线网的规划应从全局和长远的角度考虑，具有发展战略的高度，体现规划的超前性，满足未来城市的发展、旅客的出行的需求。

双层规划问题有两个层次，涉及两个决策主体，两个决策主体都有各自独立或相互矛盾的目标，控制着各自的决策变量。上层的决策主体通过某种方式影响下层的决策制定，从而实现优化自身，达到目标的目的。因此，针对双层规划问题所建立的双层规划模型，拥有两个层次，上层模型和下层模型，它们有各自的目标函数和决策变量，并且上层模型决策变量控制着下层模型的决策空间即决策变量可行区间，用上层模型与下层模型的反映函数表示。双层规划模型的基本形式如下^[32]：

UP MODE

$$\min_x F(x, y) \quad (3.1)$$

$$\text{s. t. } G(x, y) \leq 0 \quad (3.2)$$

其中， $y = y(x)$ 由下面的规划模型求得

DOWN MODE

$$\min_y f(x, y) \quad (3.3)$$

$$\text{s. t. } g(x, y) \leq 0 \quad (3.4)$$

双层规划模型是由上层规划模型 UP MODE 和下层规划模型 DOWN MODE 组成，式 (3.1) 和 (3.3) 为目标函数， $F(x, y)$ 为上层规划问题的目标函数， $f(x, y)$ 为下层规划问题的目标函数；式 (3.2) 和 (3.4) 为约束条件。上层的决策变量 x 决定下层的决策变量 y ，限制下层决策者的可行约束集，即下层的决策变量 y 是上层的决策变量 x 的函数， $y = y(x)$ ，称为反映函数。上层决策者通过下层决策者的目标函数与下层决策者相互作用。

由于公路客运由公路客运企业和旅客的相互作用共同决定公路客运线网的规划，公路客运企业以营运利润最大为目标，公路旅客以广义出行费用最小为目标，公路客运企业通过票价的制定影响旅客对不同客运方式的选择，决定公路客流分配，上层线网规划模型最终确定公路客运线网优化结果。因此，公路客运线网合理优化问题是一个典型的双层决策问题，双层规划模型成为描述交通决策过程的理想工具^[33]。

本文结合公路客运线网规划的特点，将双层规划模型应用于公路客运网络的规划研究中，建立适合公路客运线网的双层混合整数规划模型。

3.2 客流量预测

客运需求量是进行客运线网规划的基础，本文应用城市交通规划理论中的“四阶段”法对交通小区之间客流量分布进行预测，再根据下层客运均衡配流模型，得到规划年公路客运的需求量，作为上层公路客运线网的定量规划依据。

3.2.1 交通区域划分

在对客流量进行预测时，首先对规划城市进行交通区域划分，交通区域划分是确定班线站点以及站点间客流量的基础，交通小区划分的是否合理将直接影响交通流量的调查以及线网的布设。

交通区域按照不同的研究目的有不同的定义和划分原则，一般来说，交通区域^[32]是指一个交通源的集合。为了便于对客流的调查，将若干交通源合并为一个交通区域，交通区域内的社会经济、交通特点等一致。由于本文是对公路客运线路进行研究，交通区域是指具有一定的公路客运需求，通过区域内所有客运班线所辐射的一定区域范围，可以是一个地区、一个城市、县或者一个城乡集合，如图 3.1。公路客运的交通区域划分应遵循一定的原则^[34]。

(1) 由于基础资料的收集是按照行政区域的划分进行采集的，因此，交通区域的划分尽量与城市的行政区划分保持一致；

(2) 区域内的城市、县等有一定的社会经济、交通联系，鉴于客运班线辐射范围的限制，划分区域的人口、规模应适中。区域过大，客运班线的设置不能够满足城乡居民的出行需求；区域过小，区域划分过多，会使客运线路中间站点冗余，增加客运线路规划难度。

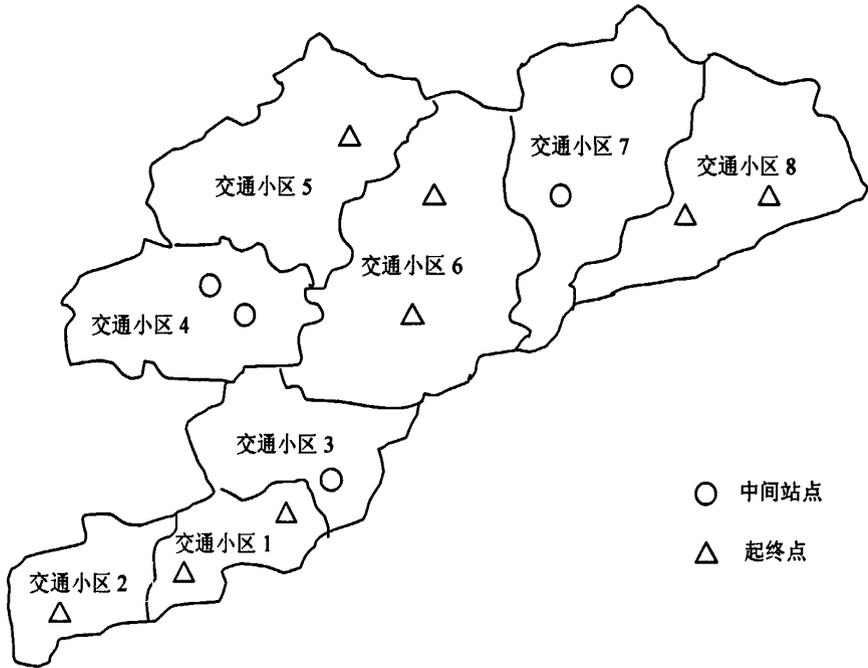


图 3.1 交通区域划分以及站点分布

Fig.3.1 Traffic district division and station distribution

为了便于以下研究，针对公路客运线路的特点，将交通小区内的市、县作为中间站点，并且中间站点的运载能力以及各交通小区之间规划年客运发生量或吸引量通过交通调查和预测可以得到。

3.2.2 交通小区客运需求总量预测

客运需求量预测是进行公路客运线网规划的基础。首先通过交通小区居民出行调查，得到交通小区城乡居民出行现状，基于现阶段客流量，应用相关预测方法对规划年城乡居民出行总量，即客运需求总量进行预测。客运需求总量的预测方法有回归预测法、增长率法、指数平滑预测法、趋势外推预测法和灰色预测法等。

(1) 回归预测法

回归分析法一种数理统计方法, 研究变量与变量之间的相互关系。与客运量直接相关的因素有国民生产总值、城市居民消费水平、城市人口等, 将这些指标作为自变量, 用过统计分析, 得到客运量与这些变量之间的关系式。为了减小误差以及由于各自变量之间的关联而产生的计算复杂性, 这里通过关联度分析, 确定其中关联度最大的因素进行一元线性回归分析, 得到客运量与该因素的线性关系式如下:

$$y = a + bx \quad (3.5)$$

其中, y 为客流量, x 关联度最大的因素, a, b 为参数, 可通过对历史数据进行统计得到。

基于未来规划年 x 的值, 通过式 (3.5) 既可以得到规划年客流量。

(2) 增长率法

增长率法是根据对平均增长率的预测, 然后再求得增长量最终确定预测对象的预测值。

通过对客流量历史数据的统计得到历年客流量增长率的变化规律, 确定规划年客流量增长率, 最后预测未来客流量。其中, 客流量增长率公式如下:

$$r = (\sqrt[n]{y_n/y_0} - 1) \times 100\% \quad (3.6)$$

其中, y_0 客流量统计期期初值, y_n 为客流量统计期期末值, n 为统计期年数。

客流量预测值的计算公式为:

$$y = y_n(1+r)^t \quad (3.7)$$

其中, y 为客流量规划年的预测值, t 为预测年份。

(3) 指数平滑预测法

指数平滑预测法是指分析事件的发展变化规律, 适用于时间序列, 预测量只与时间有关, 不需要相关因素的未来预测值进行预测, 对于未来发生的事情, 最新观察值较早期观察值所包含得与预测量相关的信息更多, 一般对近期数据赋予较大的权值, 并且权数按指数规律分布递增。

本文采用三次指数平滑预测模型对客流量进行预测, 三次指数平滑预测模型

如下:

$$y = a + bt + ct^2 \quad (3.8)$$

其中, y 为客流量预测值; t 为未来的单位时间段; a 为一次平滑系数; b 为二次平滑系数; c 为三次平滑系数。

(3) 灰色预测法

对于一个预测对象, 我们既有已知信息, 又有未知和非确定的信息, 因此属于一个灰色系统。由于原始数据的未知性以及不确定性, 不能够进行直接的预测, 因此对原始数据按照不同的计算法则, 进行生成处理, 生成有较强规律性的数据序列, 来寻找系统变动的规律, 然后针对变化规律建立相应的微分方程模型, 从而预测事物未来的发展趋势。客流量可以应用灰色模型GM(1, 1)进行预测。

(4) 趋势外推预测法

趋势外推法也是一种统计预测方法, 它是针对事物发展渐进过程的, 随着时变化或者递增或者递减, 选取适当的函数对这种趋势进行表示, 并进行趋势的外推得到预测值。这种预测方法也只需要预测对象的历史数据, 而不需相关的其他因素的数据, 只需通过对历史数据的统计, 得到预测对象相对时间的趋势变化, 确定变化函数如下:

$$y = f(x) \quad (3.9)$$

(5) 组合预测法^[2]

用于各种预测方法具有各自的优点和不足, 为了充分利用各种预测方法中有用的预测信息, 本文采用组合预测的方法对客运需求总量进行预测, 具体计算公式如下:

$$\bar{y} = \sum_i w_i y_i \quad (3.10)$$

其中, \bar{y} 为客流量的组合预测值, y_i 为应用第 i 种预测模型所得到的预测值, w_i 为第 i 种预测方法的权重。

其中, 权重由各种预测方法的标准差确定, 即标准差法。

$$w_i = \frac{S - S_i}{S} \frac{1}{n-1} \quad (3.11)$$

这里 $S = \sum_i S_i$, S_i 为第 i 种预测模型的标准差, n 为预测方法总数。

3.2.3 交通小区客流分布预测

交通小区客流分布预测是指从一个交通小区到另一个交通小区的客流发生量或吸引量, 它是在各交通小区的客流生成基础上进行预测的。从一个交通小区到另一个交通小区的旅客出行量是对两小区之间进行运力配置的根本依据。

交通小区之间的客流分布, 本文应用“四阶段法”中的客流分布预测方法—重力模型法进行预测。交通小区之间的客流分布与两个交通小区之间的经济联系程度以及小区间的距离有关^[22]。

$$q_{ij} = k_{ij} \frac{q_i^{\lambda_1} q_j^{\lambda_2}}{L_{ij}^{\lambda_3}} \quad (3.12)$$

其中, q_{ij} 为交通小区 i 与 j 之间客流量, q_i, q_j 分别为交通小区 i 与 j 的客运需求总量, k_{ij} 为交通小区 i 与 j 之间的相对经济联系程度, L_{ij} 为交通小区之间的距离, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为待定参数。

得到交通小区客流量分布后汇总成表, 形式如表 3.1。

表 3.1 交通小区客流量分布表

Tab.3.1 Passenger flow volume between districts table

| 起点 终点 | 交通小区 1 | 交通小区 2 | …… | 交通小区 n | 合计 |
|----------|--------|--------|----|--------|----|
| 交通小区 1 | | | | | |
| 交通小区 2 | | | | | |
| …… | | | | | |
| 交通小区 n | | | | | |
| 合计 | | | | | |

3.2.4 公路客运需求预测

交通小区之间的客流分布预测是对两小区之间的总的客流量进行预测，并没有进行交通方式的划分。对公路客运线路进行规划，首先应该对公路客运需求量进行预测，以往的方式划分模型所得到的客流量都是静态的。但在实际的运营中，客流量是随着客运方式的票价变动的，因此应该对客流量进行动态的分析，得到公路客流量与票价之间的关系来确定变化着的客流量。考虑到客流量变化的这一特点，本文公路客流量预测通过求解公路客运线网规划模型的上层模型——客运均衡分配模型得到。根据对不同交通方式的竞争关系分析，在对客运交通方式所承担的客流量进行确定时，以旅客出行的广义费用最小为目标，建立交通方式客流分配模型。求解模型，以票价为自变量，得到公路客运流量与票价的关系，即上下层模型的反映函数，这样得到未来公路客运所承担的旅客流量，这个流量是随着公路客运的票价变动而变动的。当公路客运流量确定后，代入上层模型，就可以对上层模型求解，对公路客运班线进行优化，得到优化结果。

3.3 可行线路选择

可行线路的确定首先寻找可行线路的起终点，然后对所有的起终点进行配对确定备选线路。不同的起终点进行配对，并经由不同的中间站点，可以形成多条备选线路。最后，通过可行线路的确定原则以及相关的长度、密度等的条件约束，在备选线路中确定公路客运的可行线路。

3.3.1 交通区域内客运线路起终点确定

每个交通小区的发生客流或吸引客流都是由该交通小区内的中间站点运送的，起终点的确定可根据交通小区的总的发生量或总的吸引量与该点的运载能力比较确定^{[26][35]}。当交通小区内发生量或吸引量大于的运载能力时，交通小区内中间站点的运力不能满足旅客出行需求，此时交通小区内需要设定客运线路的起终点站，增加班线，以增加运载能力。因此，这里将中间站点的运载能力作为设立公路客运班线起终点的标准，交通小区内中间站点的运载能力通过公式(3.12)进行计算。

$$V_0 = N_0 BY \quad (3.12)$$

其中， V_0 为交通小区内中间站点的运载能力， N_0 为交通小区内的中间站点总

数, B 为每班次每车从中间站点搭载的客流量, Y 每天经过该中间站点的总的班次。根据交通小区内各中间站点的运载能力以及客运需求情况, 将某些中间站点设定为该交通小区的起终点, 并且起终点可以根据交通小区内客流量分布情况进行布置, 交通小区内站点分布情况如图 3.1。

对于一些特别的交通小区, 如旅游景区、客运站所在地等, 即使其出行发生量或吸引量没有超过小区内中间站点的运载能力, 也要在交通小区内设立起终点。

可行的客运线路确定以及线网的优化是基于客流量的预测。为了便于计算, 这里将需要设置站点的交通小区看作一个起终点, 站点之间客流量的预测即为交通小区之间的客流量的预测。

3.3.2 可行线路选择原则

当客运线路的起终点确定后, 对这些起终点进行配对, 并经过不同的中间站点可以得到不同的备选线路。为了使旅客出行时间最短, 这里将起终点之间的最短的备选路线作为可行线路。在可行班线确定时可以参考原有班线的运载能力以及客运需求, 进行原线路的改造以及新线路的开发, 以形成可行的公路客运线网。同时, 可行线路应按照以下原则进行确定。

- (1) 公路客运可行班线应具有可通行的公路网络;
- (2) 为最大限度满足旅客出行需求, 线路的走行方向应与主要客流方向一致;
- (3) 按照城乡客运一体化的要求, 对于二级、三级班线可以适当通过旅客出行需求较大的县、镇;
- (3) 线路的布置应该考虑各交通小区的连通性, 减少旅客出行中转次数;
- (4) 公路客运线网规划方案必须保证重要节点是连通的, 避免形成网络孤点;
- (5) 尽量减少线路的重复, 避免客运资源的浪费。

3.3.3 可行线路的确定

根据可行班线确定原则, 可行班线应满足以下约束条件。

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (3.13)$$

$$\left[\frac{l_w}{d_w} \right] \leq \left[\frac{l}{d} \right]_{\max} \quad (3.14)$$

$$K \leq 6 \quad (3.15)$$

其中, l 表示可行班线的长度, d 表示所布线路两点之间的直线距离, K 表示两点之间线路的重复系数。

式 (3.13) 表示对线路长度的约束; 式 (3.14) 表示对线路的非直线系数的约束; 式 (3.15) 表示对任意两点间所有线路的重复性的约束。

可行线路确定后, 对于公路客运企业是否经营该线路, 通过由公路客运线网规划模型的上层模型进行确定。根据可行线路的选择原则以及定量的约束条件 (3.13) (3.14) (3.15) 进行逐条布线, 然后应用公路客运线网双层优化模型对可行线路进行优化, 形成优化网络, 实现公路客运资源的合理配置与公路客运线网优化, 达到经济、方便、安全地满足公路客运需求的目的。

这里将所确定的可行线路集合设为 H , 可行线路 $h \in H$, 共有 G 条可行班线; 可行班线 h 上的站点集合设为 I_h , 站点 $i_h \in I_h$, 共有 n_h 个站点。

3.4 公路客运线网规划模型设计

结合公路客运特点, 本文应用双层规划模型对公路客运线网进行分层优化, 上层规划问题可以表示为公路客运企业在规定的范围内制定最佳的旅客票价并对客运资源进行合理规划, 在满足客运需求的条件下企业取得理想的经济效益最大。下层规划问题可以表示为多种客运方式竞争条件下, 客流量在不同客运方式之间的分配, 它的目标是使旅客的广义出行费用最小。两方面相互作用的得到公路客运的最优票价和班线优化结果, 即双层规划问题的最优解, 可以为公路客运企业合理规划客运班线和在不同时期制定合理的旅客票价提供定量分析的依据。

3.4.1 模型建立的假设条件

在两站点之间存在着多种客运方式, 相关因素较多, 不能够逐一详细的体现出来, 在建模时应该对这些因素进行统一和简化, 以便于模型的建立。为了便于公路客运线网双层模型的建立与求解, 本文进行了如下的假设:

(1) 城市市域内存在 n 个站点, 站点集合设为 N , 通过交通调查可以得到各

站点之间的客运出行量和吸引量，并且通过预测分析，可以得到站点间的客流分布；

(2) 公路客运线网上所有班线营运车辆类型、载客能力相同，只求出班线配置的班次数以及配置车辆数，客运企业可根据所需班次进行车辆的具体调度；

(3) 站点 i, j 之间各种客运方式的广义出行费用可以用同一计算公式表示；

(4) 站点 i, j 之间的公路客运票价（费用）为两站点之间各班线的平均费用；

(5) 站点 i, j 之间某种客运方式不存在或两点之间不能连接时，可令其运输成本最大。

3.4.2 客运均衡配流模型

在对公路客运线网进行优化时，客流量是班线规划的基础，班线的设置，班次的确定等都要依据客流量的多少。而客流量是在各种客运方式之间进行动态的均衡分配，影响客流量的主要因素是各种客运方式的票价。因此，应该确定客流量与票价之间的关系。本文通过客流均衡模型进行确定，并将客流均衡模型作为下层模型。

(1) 广义出行费用

根据 2.2.2 关于客运票价与客流量关系的分析，建立客运均衡配流模型，作为公路客运线网双层规划模型的下层规划模型，求出票价与客流量关系的具体表达式。在建模之前，先介绍旅客的广义出行费用。

旅客的广义出行费用^[36]不仅包括购票费用，还包括出行时间、舒适度、安全性等因素，它与旅客的出行时间、出行费用（票价）、服务水平等因素有关。

广义出行费用函数 U 可以采用指数函数的形式，也可以采用对数函数的形式，本文采用对数形式如下：

$$U(q_{ij}^l) = a(q_{ij}^l)^b + \alpha_1 t_{ij}^l + \alpha_2 P_{ij}^l - \alpha_3 c_{ij}^l \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M) \quad (3.16)$$

其中， $a, b, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为待定参数， t_{ij}^l 为站点 i, j 之间的出行时间因素， P_{ij}^l 为旅客票价因素， c_{ij}^l 为服务水平，包括方便性、舒适性、安全性等因素。

M 为客运方式集合，客运方式 $l \in M$ 元素个数为 m 。

(2) 客运流量均衡状态

Wordrop 于 1952 年首次提出流量均衡分配原则, 近年来, 由于均衡配流方法的实用性, 在交通分配理论中得到广泛应用。Wordrop 均衡配流原则^[19]可表述为: 在起终点之间所有可供选择的路径中, 用户所使用的各条路径的出行费用全部相等, 并且不大于未被使用的路径的出行费用。这里的出行费用是指旅客的广义出行费用。满足这一原则的交通状态被称为 Wordrop 均衡状态。我们将这一原则应用于多种客运方式客流分配中就会形成客运流量均衡状态。

公路旅客运输处于整个客运市场中, 在客运市场中公路客运方式的客流量要受到自身以及其他客运方式的票价、运输时间、服务水平等因素的影响。旅客会试图选择最佳的出行方式来达到广义出行费用最小的目的。当其他客运方式的运输时间、服务水平等因素不变, 某种客运方式的票价变动时, 旅客通过选择最佳出行方式, 在各种客运方式间达到一个稳定均衡的客流分布, 此时旅客所选择的客运方式的广义出行费用最小, 并且各种客运方式的广义出行费用相等, 达到均衡状态。当某种运输方式的票价再次变动时, 旅客会重新做出选择, 最终达到新的平衡状态。可以用 Beckmann 提出的数学形式描述客流已经达到了均衡状态。

$$u_{ij}^l = \begin{cases} = u_{ij}(\min) & (q_{ij}^l > 0) \\ > u_{ij}(\min) & (q_{ij}^l = 0) \end{cases} \quad (i, j \in N, i \neq j, l \in M) \quad (3.17)$$

其中: u_{ij}^l 为站点 i 到 j 之间客运方式 l 的广义出行费用; $u_{ij}(\min)$ 为均衡状态下站点 i 到 j 之间的广义出行费用, 即最小的广义出行费用; q_{ij}^l 为站点 i 到 j 之间客运方式 l 的客流量。

(3) 客运均衡配流模型

对于 Beckmann 提出的均衡状态的数学形式还可以用下面的数学规划模型表示, 称为客运均衡配流模型^[37]。

$$\min C(q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m \int_0^{q_{ij}^l} U(x) dx \quad (3.18)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^m q_{ij}^l = q_{ij} \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M) \quad (3.19)$$

$$q_{ij}^l \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M) \quad (3.20)$$

$U(x)$ 为广义出行费用函数，是客流量 q_{ij}^l 的函数，可以表示为 $u_{ij}^l = f(q_{ij}^l), (i, j \in N, i \neq j; l \in M)$ ， u_{ij}^l 为站点 i 到 j 之间客运方式 l 的广义出行费用。 q_{ij} 为站点 i 到 j 之间的总的客流量。

式 (3.18) 为目标函数，表示旅客选择各种客运方式出行时，广义出行费用最小；式 (3.19) 表示站点 i 到 j 之间各种客运方式所承担的客流量之和等于总的客流量；式 (3.20) 为客流量非负约束条件。

这里将客运均衡配流模型作为公路客运线网双层规划模型的下层模型。

3.4.3 公路客运线网双层规划模型

在市场经济体制下，各种运输方式之间存在着竞争关系，对于旅客运输体现在不同客运方式之间的替代关系，即各种客运方式的价格弹性需求分析。当某种方式的旅客票价很高时，客流量就会转移到其他交通方式上，这种交通方式所分担的客流量就会减少；当旅客票价较低时，又对客流产生一定的吸引力，使分担的客流量增加。票价是影响某种交通方式的客流量的主要因素，客流量还取决于该种运输方式的时间、舒适性、安全性等。价格是市场经济体制的核心。在客运市场中，对于客运企业，需要制定合理的票价，以吸引足够的客流量，才能够达到期望的企业利润；对于旅客，会根据票价、时间、舒适性、安全性等因素对客运方式进行自发的选择，决定着客流的方向和客流量。因此在制定合理的旅客票价后，根据客流量对客运班线进行系统的规划，是既能满足旅客出行需求又能够使客运企业利润最大化的科学方法。因此客运线路的规划需要综合考虑客运企业和旅客的利益，在各种运输方式在竞争环境下，使旅客出行费用最小；同时，根据交通基础设施、现有交通网络、客运需求特点、交通企业投资等，对客运班线进行规划，以达到合理制定票价，最大限度满足客运需求，实现客运企业利润最大化的目标。

本文通过构建客运流量均衡配流模型，得到客流与票价之间的关系，在此基础上对客运班线进行规划。

上层线网规划模型^{[23][46]}以企业利润最大为目标函数，模型如下：

$$\max P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q'_{ij} P'_{ij} - \sum_{h=1}^G C_h y_h \quad (i, j \in N) \quad (3.21)$$

$$\text{s. t.} \quad P_{\min} \leq P'_{ij} \leq P_{\max} \quad (3.22)$$

$$\sum_{(h|_h=i, j_h=j)} V \alpha y_h \leq q'_{ij} \leq \sum_{(h|_h=i, j_h=j)} V y_h \quad (i, j \in N, i \neq j; i_h, j_h \in I_h) \quad (3.23)$$

$$t'_h y'_h \leq t_A A_h \quad (h \in H) \quad (3.24)$$

$$y'_h \geq 0 \quad (3.25)$$

其中, C'_h 为可行线路 h 的客运班次成本, 包括车辆营运的固定费用、变动费用、站务费、管理税费等。固定费用主要是车辆的购置费用, 设每天的分摊的折旧费用为 $C'_{hA} = C_A A_h / 365$, C_A 为每辆车每年的平均折旧费; 车辆营运的可变费用主要与车辆行驶距离、油价有关, 设每辆车每班次平均里程的可变费用为 F_h , 则 $C'_h = C_{hA} + F_h L_h = C_{hA} A_h / 365 + F_h L_h$; 这里可将目标函数变为

$$\max P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q'_{ij} P'_{ij} - \sum_{h=1}^G (C_{hA} A_h / 365 + F_h L_h y_h)。$$

t'_h 为可行班线 h 上车辆一个班次的往返时间, t_A 为车辆每天最多营运时间, $t'_h = L_h / v_A$, L_h 为可行班线 h 的班线距离, v_A 为车辆行驶速度。

y'_h 为可行线路 h 的客运班次数, 未知变量; A_h 为可行线路 h 上所配置的车辆数; P_{\max} 为站点 i, j 之间票价的最大值, 一般由政府确定; P_{\min} 为站点 i, j 之间票价的最小值, 等于公路客运企业一个班次的运营成本; V 为单车最大载客量; α 为单车实载率。

式 (3.21) 为目标函数, 表示公路客运企业经营利润最大; 式 (3.22) 是对站点 i, j 之间平均票价的约束;

式 (3.23) 表示通过城市任意两站点间的所有客运班线, 在保证实载率的条件下, 运载能力总和大于这两站点间的客运需求量;

式 (3.24) 表示对班线营运时间的限制, 每条可行班线的营运时间应小于可行班线所有配置车辆的总营运时间;

式 (3.25) 为客运班线班次的非负约束条件。

这样得到公路客运线网规划双层模型 (M) 如下:

U (1)

$$\min C(q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m \int_0^{q_{ij}^l} U(x) dx$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^m q_{ij}^l = q_{ij} \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M)$$

$$q_{ij}^l \geq 0 \quad (i, j \in N; i \neq j; l \in M)$$

L (2)

$$\max P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{ij}^l P_{ij}^l - \sum_{h=1}^G (C_{hA} A_h / 365 + F_h L_h y_h) \quad (i, j \in N)$$

$$\text{s. t. } P_{\min} \leq P_{ij}^l \leq P_{\max}$$

$$\sum_{(h|_h=i, j_h=j)} V \alpha y_h \leq q_{ij}^l \leq \sum_{(h|_h=i, j_h=j)} V y_h \quad (i, j \in N, i \neq j; i_h, j_h \in I_h)$$

$$t_h y_h \leq t_A A_h \quad (h \in H)$$

$$y_h \geq 0$$

3.5 公路客运线网规划模型求解

3.5.1 双层规划模型求解思路

一般来说, 双层规划问题是一个 NP-hard (nondeterministic polynomial time complete NP-hard) 问题, 这种问题还没有一种有效的算法, 即使最简单的双层线性规划问题也是一个 NP-hard 问题, 不存在多项式的求解算法。只能通过近似的算法求解, 目前常用的求解算法可以分五大类, 即极点搜索法 (Extreme Point Search Method)、库恩-塔克法 (Karush-Kuhn-Tueker Method, 简称 K-T 法)、下降法 (Descent Method) 和直接搜索法 (Direct Search Method) 和非数值优化方法 (主要包括模拟退火、遗传算法和蚁群算法等) [18]。

对于交通网络设计中的双层规划模型, 上层规划模型为网络设计模型, 下层

模型为均衡配流模型，可以应用基于灵敏度分析法的启发式算法 SAB (Sensitivity Analysis Based Algorithm) [18][38-40]进行求解。首先应用灵敏度分析法求解均衡配流模型，得到客流量对扰动参数的导数，这里的扰动参数被设定为旅客票价。再应用泰勒公式，将客流量与旅客票价之间的复杂的、关系未知的非线性函数近似表达为线性的函数关系。然后再将这一线性关系代入上层规划模型中，便得到了一个普通的非线性规划问题，应用已有方法进行求解，得出新的票价和网络规划方案；再将新的票价应用到下层模型，得到客流量与票价的线性关系，代入上层模型继续求解，如此迭代直到上层问题的解收敛于原问题的解，得到最优网络规划方案。

3.5.2 客运均衡配流模型求解

客流均衡配流模型可以得到旅客对某种客运方式的需求量与票价之间的关系，采用灵敏度分析法进行求解。灵敏度分析法主要应用于变分不等式中，可以求出变分不等式的解对它的扰动参数的导数，再根据泰勒展开式求出客运需求量与票价之间的关系。

(1) 客运均衡配流模型转换为变分不等式

3.4.2 中的客运均衡配流模型可表示为一个变分不等式 (3.26)，形式如下：

$$U(q_{ij}^0)(q_{ij} - q_{ij}^0) \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (3.26)$$

其中， $U(q_{ij}^0) = (U(q_{ij}^{10}), U(q_{ij}^{20}), \dots, U(q_{ij}^{m0}))$ 为广义出行费用向量， $U(q_{ij}^{l0})$ 表示选择第 l 种客运方式的旅客的广义出行费用；

$q_{ij} = (q_{ij}^1, q_{ij}^2, \dots, q_{ij}^m)^T$ 表示客运需求量向量， q_{ij}^{l0} 表示旅客对第 l 种客运方式的客运需求量， $q_{ij}^0 = (q_{ij}^{10}, q_{ij}^{20}, \dots, q_{ij}^{m0})^T$ 表示客运均衡配流模型的一个均衡解，并且满足 $\Lambda q_{ij} = \Lambda q_{ij}^0 = Q_{ij}$ ， $\Lambda = (\lambda_{ij}^1, \lambda_{ij}^2, \dots, \lambda_{ij}^m)$ 表示站点 i 与 j 之间与客运方式 l 的关联向量，当 i, j 之间存在客运方式 l 时， $\lambda_{ij}^l = 1$ ，否则为 0。客运需求量 q_{ij} 的大小受到客运方式的票价、时间、服务水平等因素的影响。

(2) 客运需求与票价关系表达式求解

客运均衡配流模型所对应变分不等式 (3.18)，其证明过程见文献[21]。变分不

等式的解为起始点 i 与终点 j 之间所有客运方式的客运需求量 $q_{ij}^1, q_{ij}^2, \dots, q_{ij}^m$, 它的扰动参数为旅客票价 P_{ij} , 并假设影响旅客选择客运方式的运输时间、舒适度、安全性等其他因素不变。这样变分不等式 (3.26) 可表示为

$$U(q_{ij}^0(P_{ij}), P_{ij})(q_{ij} - q_{ij}^0(P_{ij})) \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (3.27)$$

其中, $q_{ij} \in \{q_{ij}(P_{ij}) \mid \Lambda q_{ij} = Q_{ij}\}$ 表示旅客票价所对应的客流均衡状态集合, $q_{ij}^0(P_{ij})$ 表示所有客运方式的 $P_{ij}^l (l=1, 2, \dots, m)$ 确定后, 客运方式之间的客流量分配情况, 即旅客票价向量 P_{ij} 所对应的客运需求向量 $q_{ij}(P_{ij})$, 但其对应关系是未知的, 客流量与票价的对应关系求解过程如下。

设 $q_{ij}^0(P_{ij}^0)$ 是当扰动参数 $P_{ij} = P_{ij}^0$ 时, 客运均衡配流模型的一个解, 也是变分不等式当 $P_{ij} = P_{ij}^0$ 时的解, 并且这个解是唯一的, 求解方法见本节 3 小节。

根据文献^[36], 变分不等式在 $P_{ij} = P_{ij}^0$ 时有解的必要条件为

$$U(q_{ij}^0(P_{ij}), P_{ij}) - \mu_{ij}(P_{ij}) = 0 \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (3.28)$$

$$\Lambda q_{ij}^0(P_{ij}) = Q_{ij} \quad (i, j \in N, i \neq j) \quad (3.29)$$

其中, $\mu_{ij}(P_{ij})$ 是一个有 m 个相同元素的拉格朗日乘子列向量。

设 $y(P_{ij}) = [q_{ij}(P_{ij}), \mu_{ij}(P_{ij})]^T$, 用 $J_y(P_{ij})$ 表示式 (3.28) 和式 (3.29) 对 $[q_{ij}(P_{ij}), \mu_{ij}(P_{ij})]$ 的雅克比矩阵, 用 $J_{P_{ij}}(P_{ij})$ 表示表示式 (3.28) 和式 (3.29) 对 P_{ij} 的雅克比矩阵, 那么有如下结果:

$$\nabla y(P_{ij}) = [J_y(P_{ij})]^{-1}, [-J_{P_{ij}}(P_{ij})] \quad (3.30)$$

根据泰勒展开式可以得到

$$y_{ij}(P_{ij}) = y(P_{ij}^0) + \nabla y(P_{ij}^0) P_{ij} \quad (3.31)$$

即

$$[q_{ij}(P_{ij}), \mu_{ij}(P_{ij})]^T = [q_{ij}^0(P_{ij}^0), \mu_{ij}(P_{ij}^0)]^T + [J_y(P_{ij}^0)]^{-1} [-J_{P_{ij}}(P_{ij}^0)] \bullet [P_{ij} - P_{ij}^0] \quad (3.32)$$

这样就得到了旅客对不同客运方式的客运需求量与票价之间的关系。

(3) 初始解求解方法

在分析变分不等式, 对客运需求与票价关系表达式求解时, 需要一个初始解 $q_{ij}^0(P_{ij}^0)$, 其求解方法如下。

某一均衡状态下的 P_{ij}^0 确定时, 旅客选择某一客运方式的广义出行费用 $U(q_{ij}(P_{ij}), P_{ij}) = U(q_{ij})$, 只存在一个变量 q_{ij} , 代入下层规划模型, 客运均衡配流模型表达形式变为:

L (2.1)

$$\min C(q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m \int_0^{q_{ij}^l} U(q) dq$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^m q_{ij}^l = q_{ij} \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M)$$

$$q_{ij}^l \geq 0 \quad (i, j \in N, i \neq j; l \in M)$$

当每种客运方式的票价确定时, 广义出行费用, 只与客流量有关, 不受客运方式的票价、时间、服务水平等相关因素的影响。对 L (2.1) 进行求解, 可以得到票价 P_{ij}^0 下, 客运方式的均衡配流结果, 即旅客对各种客运方式的客运需求量 $q_{ij}^0(P_{ij}^0)$, 作为对下层模型灵敏度分析求解客运需求量对票价导数的依据。

3.5.3 公路客运线网双层规划模型求解

首先应用灵敏度分析法求解均衡配流模型, 得到客流量与旅客票价之间的近似的线性函数关系。然后再将线性关系式代入上层规划模型中, 便得到了一个普通的非线性规划问题, 应用已有方法进行求解, 应用非线性规划模型求解算法进行求解, 得出公路客运班线设置、班线班次、新的旅客票价等信息; 再将新的票价应用到下层模型, 得到客流量与票价的线性关系, 代入上层模型继续求解, 如此迭代直到上层问题的解收敛于原问题的解。

首先, 设 P_{ij}^{10} 为站点 i, j 之间公路客运票价的初始值, 假定其他客运票价不变,

通过求解下层模型得到站点 i, j 之间所有客运方式客流量的初始向量 $q_{ij}^0(P_{ij}^0)$ 。再应用灵敏度分析方法求得多种客运方式竞争条件下, 旅客对客运方式的客运需求量对旅客票价的导数 $\frac{\partial q_{ij}}{\partial P_{ij}}$, 应用泰勒展开式求得客运需求量与票价之间的近似关系:

$$q_{ij}(P_{ij}) = q_{ij}^0(P_{ij}^0) + \frac{\partial q_{ij}}{\partial P_{ij}} \cdot [P_{ij} - P_{ij}^0] \quad (3.33)$$

代入上层规划模型, 上层规划问题变成一个以旅客票价和班线班次为变量的非线性优化问题, 应用已有方法进行求解, 得到新的票价 P_{ij}^1 , 代入下层模型, 又得到新的客流分配结果, 如此重复计算直到得到双层规划模型的最优解。

基于灵敏度分析法的公路客运线网双层规划模型具体的求解步骤如下:

- (1) 设定旅客票价初始解为 P_{ij}^0 , 此时迭代次数 $k = 0$;
- (2) 基于 P_{ij}^k 求解下层模型, 得到可行班线上的客运需求量初始解 $q_{ij}^k(P_{ij}^k)$ 。
- (3) 应用灵敏度分析法得到客运需求量对旅客票价的导数 $\frac{\partial q_{ij}}{\partial P_{ij}}$, 得到式

$$q_{ij}(P_{ij}) = q_{ij}^k(P_{ij}^k) + \frac{\partial q_{ij}}{\partial P_{ij}} \cdot [P_{ij} - P_{ij}^k] \quad (3.34)$$

- (4) 将式 (3.34) 代入上层规划模型求解, 得到一组新的旅客票价 P_{ij}^{k+1} 。
- (5) 对票价进行检验, 如果 $|P_{ij}^{l,k+1} - P_{ij}^{l,k}| \leq \varepsilon (l \in M)$, 则停止计算, 其中 ε 为迭代精度, 否则, 令 $k = k + 1$, 转入步骤 (2)。

双层模型的求解最终得到最优的公路客运班线设置、班线班次确定与最佳旅客票价, 为公路客运线网规划以及客运的管理提供依据。而且对公路客运的分析是在客运市场竞争条件下, 当某一客运方式的票价发生变化时, 可以对公路客运线网进行实时、动态的优化, 对特定时期定价水平和客运资源的配置有很好的指导作用。

第 4 章 实例分析

本文以大连市公路客运主干线网^[44]为例,应用公路客运线网双层规划模型进行优化,得到大连市主干线网优化结果,符合实际,为大连市公路客运规划与管理提供了参考。同时证明了公路客运线网双层规划模型及其算法的实用性。

大连地处辽东半岛南端,濒临渤海和黄海,总面积 12,574 平方公里。大连是我国的副省级城市、计划单列市,也是全国 14 个沿海开放城市之一;是东北地区最大的港口城市,辽宁省内第二大城市。大连还是我国著名的避暑胜地和旅游热点城市,是我国东北、华北、华东地区主要的对外门户。预计到 2015 年,城市人口规模 410 万人;2020 年,城市人口规模 500 万人,城镇化水平达到 100%。规划期内,城市人口规模年均增长 2.79%;到 2015 年,人均城市建设用地面积 105 平方米,城市建设用地面积 430.5 平方公里;2020 年,人均城市建设用地面积 99.2 平方米,城市建设用地面积 496.0 平方公里。

4.1 大连市客运交通发展现状

大连市作为国家交通枢纽规划城市之一,大连市的交通发展特别是城市客运交通快速发展,城市轨道交通、公路交通正处于大规模建设之中,城市交通基础设施不断完善;城市内客运企业规模不断增加,经营范围逐渐从城市向乡镇深入,企业管理模式发生转变,运输组织更加科学,管理理念更加先进。随着大连城市交通的发展,综合客运交通系统将不断完善。同时,大连经济社会以及客运交通的发展加快了旅游、出差、学生等旅客流动,客运需求不断增加,而且需求结构也在改变,旅客对交通方式的票价、时间、服务水平等有了更高的要求。新的客运交通形式的发展对大连市客运交通的规划提出了新的要求。在综合客运体系下,使城市公路客运线网更加经济、快捷、舒适、安全地满足旅客出行需求,是未来大连市客运系统规划的要求和重要依据。

4.1.1 大连市客运交通基础设施建设

目前,大连市旅客运输的主要交通方式有公路客运、轨道交通和私家车。大连市公路建设已进入了成熟的阶段,轨道交通也处于蓬勃建设之中,形成了多种客运方式,为旅客的出行提供了方便。

各种客运交通方式的运营基础是客运的路径，下面介绍大连市客运交通基础设施的建设情况。

(1) 公路网建设

大连市“十一五”期间“四网一环”的公路网布局建设加强了市域内及城乡间的通达性，实现了客畅其行，缩短了中心城区内部与中心城区通达市辖各乡镇的时空距离，形成“两小时经济圈”，为人民出行提供了便利条件。其中，“四网一环”的公路网布局是指高速公路网、经济干线网、区域连通网、农村公路网以及环滨海公路。

到2010年底，大窑湾疏港路、沈大与丹大连接线等4条高速公路已竣工或建成；长兴岛疏港高速公路已经开工建设；在建滨海公路里程达到368公里。全市公路总里程达到7500公里，路网密度达到每百平方公里60公里，高速公路达到400公里，一级公路达到600公里，二级以下公路6500公里。实现高速公路相互连接，贯通各区市，一级公路直通邻近区市并连通各主要乡镇。

目前，初步形成了以沈大和大庄高速公路、旅顺南路、土羊高速公路贯穿南北，以国省干线公路为主骨架的公路网和以市区为中心的2小时直达各区市的经济活动圈。

大连市公路网规划与建设如图4.1。

东北东部铁路通道,形成“Y”字型干线铁路网布局结构。市内规划新建长兴岛铁路、庄岫铁路。

大连市城市轨道交通规划及发展如图 4.1 和图 4.2。

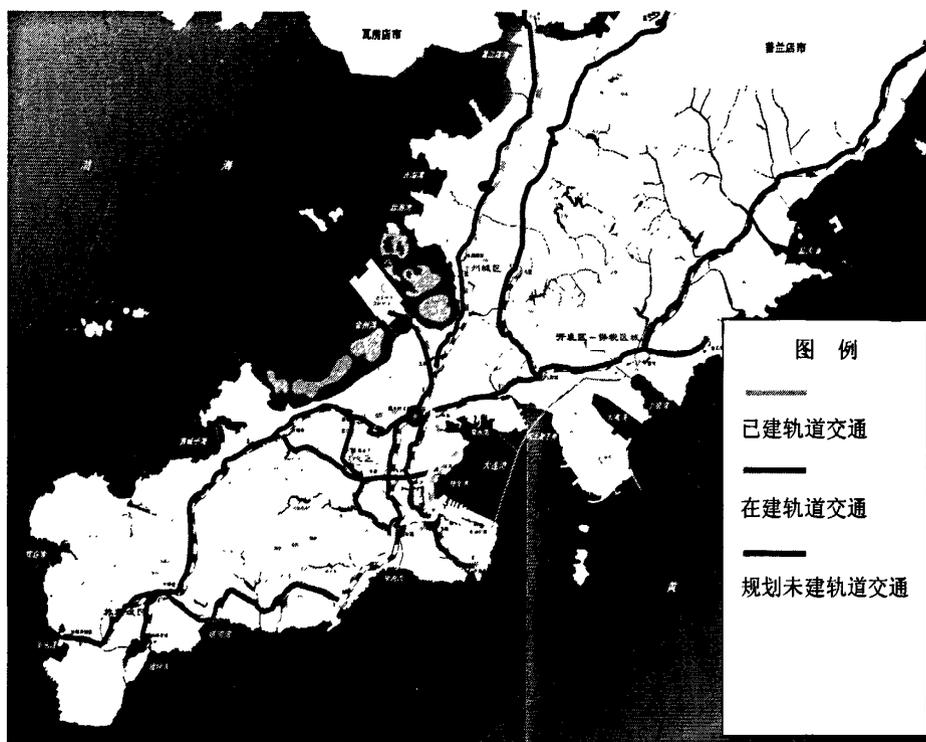


图 4.2 大连市城市轨道交通规划与建设情况

Fig.4.2 present situation and planning of trail way network in Dalian

交通基础设施的建设是实现旅客运输的基础。大连市客运交通基础设施不断完善,连接了市域内各区市、县、乡镇,客运路径更加畅通,旅客出行更加方便。

4.1.2 大连市交通小区划分与小区客运情况

大连全市总面积 12574 平方公里,2009 年末,全市常住人口 617 万人,户籍总人口为 584.68 万人,人口密度为 465 人/平方公里。现辖六区三市一县:中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区、旅顺口区、金州区、瓦房店市、普兰店市、庄河市、长海县。另外,还有大连经济技术开发区、大连保税区、大连高新技术产业园区、大连金石滩国家旅游度假区、大连出口加工区 5 个国家级对外开放先导区。按照本文客运交通区域划分要求,对大连市公路客运主干线网进行规划时,首先

表 4.1 2009 年交通小区及其客流量情况

Tab.4.1 the situation of traffic district and passenger flow volume

| 交通小区 | 分区名称 | 面积 (平方公里) | 人口 (人) | 地区生产 总值 (亿元) | 总客流量 (万人) | 公路客流量 (万人) |
|------|------|--------------|-----------|-----------------|--------------|---------------|
| 1 | 老城区 | 550.27 | 7522636 | 1328 | 6429.59 | 5644.24 |
| 2 | 旅顺口区 | 512.15 | 213850 | 150 | 655.74 | 575.64 |
| 3 | 金州区 | 964.54 | 741660 | 500 | 2128.43 | 1868.45 |
| 4 | 开发区 | 388 | 390000 | 1002 | 752.23 | 660.35 |
| 5 | 普兰店市 | 3576.4 | 819486 | 390 | 1933.04 | 1696.93 |
| 6 | 瓦房店市 | 2769.9 | 1026189 | 650 | 2472.69 | 2170.66 |
| 7 | 庄河市 | 3655.7 | 908440 | 390 | 2100.28 | 1843.74 |
| 合计 | | 12416 | 11622261 | 16472 | 4410 | 14460 |

注：《2010 大连统计年鉴》

4.1.3 大连市公路客运主干线现状

城市公路客运主干线是指城市市域内市区之间或与其下属区县之间的公路旅客运输线路。截止到 2010 年，大连市域内公路客运主干线共有 20 条，根据起讫点所属交通区域进行客运线路信息的统计^[42-43]，结果如下表 4.2。

表 4.2 大连市公路客运主干线班线班次信息 (班次/天)

Tab.4.2 passenger traffic frequency of trunk road in Dalian

| 起终点 | 老城区 | 旅顺 | 金州 | 开发区 | 普兰店 | 瓦房店 | 庄河 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 老城区 | - | 253 | 184 | 314 | 104 | 53 | 85 |
| 旅顺 | 253 | - | 12 | 8 | 6 | 4 | 0 |
| 金州 | 184 | 12 | - | 105 | 32 | 8 | 3 |
| 开发区 | 314 | 8 | 105 | - | 21 | 43 | 25 |
| 普兰店 | 104 | 6 | 32 | 21 | - | 109 | 10 |
| 瓦房店 | 53 | 4 | 8 | 43 | 109 | - | 14 |
| 庄河 | 85 | 0 | 3 | 25 | 10 | 14 | - |
| 合计 | 993 | 30 | 160 | 202 | 178 | 178 | 52 |

4.2 大连市客运需求预测

公路客运线网规划是以公路客运需求量为基础，公路客运需求量的预测在线网规划中占有重要的地位。

应用 3.3.1 节客流总量的组合预测方法，对大连市 2015 年客运需求总量进行预测后，再应用分类模型法对大连市各交通小区客运需求量进行预测，结果见表 4.3。

表 4.3 2015 年交通小区客运需求总量预测（万人次）

Tab.4.3 Total passenger flow volume of traffic district of Dalian in 2015

| 老城区 | 旅顺 | 金州 | 开发区 | 普兰店 | 瓦房店 | 庄河 | 合计 |
|------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| 8848 | 2660 | 2929 | 3403 | 2890 | 2660 | 902 | 22668 |

根据表 4.3 数据，应用重力模型公式（3.5）经过计算得到交通小区之间的客流分布如表 4.4。

表 4.4 2015 年交通小区间客运需求分布预测（人次/天）

Tab.4.4 passenger flow volume between districts in 2015

| 终点 | 起点 | 老城区 | 旅顺 | 金州 | 开发区 | 普兰店 | 瓦房店 | 庄河 |
|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 老城区 | 老城区 | 0 | 14,709 | 12,358 | 22,218 | 6,685 | 3,525 | 4,960 |
| 旅顺 | 旅顺 | 14,709 | 0 | 513 | 2,176 | 270 | 149 | 13 |
| 金州 | 金州 | 12,358 | 513 | 0 | 8,038 | 2,179 | 257 | 192 |
| 开发区 | 开发区 | 22,218 | 2,176 | 8,038 | 0 | 2,024 | 2,186 | 2,282 |
| 普兰店 | 普兰店 | 6,685 | 270 | 2,179 | 2,024 | 0 | 6,794 | 577 |
| 瓦房店 | 瓦房店 | 3,525 | 149 | 257 | 2,186 | 6,794 | 0 | 641 |
| 庄河 | 庄河 | 4,960 | 13 | 192 | 2,282 | 577 | 641 | 0 |
| 合计 | 合计 | 64,455 | 17,831 | 23,536 | 38,922 | 18,529 | 13,551 | 8,664 |

4.3 大连市公路客运可行线路确定

根据大连市客运交通区域划分，共有 7 个交通小区，即有 7 个站点，分别为

老城区、旅顺口区、金州区、开发区、瓦房店市、普兰店市、庄河市。对这个站点按照顺序进行编号，得到站点集合 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。对每个交通小区进行分析，其客运需求量均大于中间站点运载能力，因此交通小区内都需设立起终点。因此可以将每个交通小区看作客运班线的起终点，确定公路客运可行班线。

根据可行班线确定原则以及选择条件，对起终点进行配对，大连市公路客运主干线可以设置40条可行班线，如下表4.5：

表4.5 大连市公路客运主干线可行线路

Tab.4.5 feasible set bus routes in Dalian

| 班线编号 | 途经站点 | 班线编号 | 途经站点 | 班线编号 | 途经站点 | 班线编号 | 途经站点 |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| $h=1$ | 1-2 | $h=11$ | 1-4-7 | $h=21$ | 2-3-5 | $h=31$ | 3-4-7 |
| $h=2$ | 1-3 | $h=12$ | 1-4-5-6 | $h=22$ | 2-1-3-4 | $h=32$ | 4-5 |
| $h=3$ | 1-4 | $h=13$ | 2-3 | $h=23$ | 3-4 | $h=33$ | 4-6 |
| $h=4$ | 1-5 | $h=14$ | 2-4 | $h=24$ | 3-5 | $h=34$ | 4-7 |
| $h=5$ | 1-6 | $h=15$ | 2-5 | $h=25$ | 3-6 | $h=35$ | 4-5-6 |
| $h=6$ | 1-7 | $h=16$ | 2-6 | $h=26$ | 3-7 | $h=36$ | 4-5-6-7 |
| $h=7$ | 1-3-5 | $h=17$ | 2-7 | $h=27$ | 3-1-2 | $h=37$ | 5-6 |
| $h=8$ | 1-3-5-6 | $h=18$ | 2-1-3 | $h=28$ | 3-5-6 | $h=38$ | 5-7 |
| $h=9$ | 1-3-5-6-7 | $h=19$ | 2-1-4-7 | $h=29$ | 3-5-7 | $h=39$ | 5-6-7 |
| $h=10$ | 1-4-5 | $h=20$ | 2-1-3-5-6 | $h=30$ | 3-5-6-7 | $h=40$ | 6-7 |

4.4 大连市公路客运线网规划

大连市交通小区之间客运需求量以及可行班线确定后，下面建立大连市公路客运线网双层规划模型，应用 Lingo 软件进行编程并求解。

4.4.1 基础数据准备

大连市城市内部客运方式主要有公路交通、轨道交通、私家车。旅客根据各种运输方式的票价、旅行时间、舒适度、安全性进行选择，最终在各种运输方式中形成均衡、稳定的客流。根据目前我国交通基础设施的建设情况，旅行时间、

舒适度、安全性等于交通硬件相关的因素一段时间内变化较小。根据对大连市交通基础资料的调查与分析,大连轨道交通参照铁路以及已有轻轨交通票价的制定,私家车按平均里程出行成本计算,得到公路客运、轨道交通、私家车的相关因素的数据,设公路序号为1,轨道为2,私家车为3。站点间客运方式相关因素值如表4.6。

表4.6 站点间各种客运方式的客运相关因素值

Tab.4.6 passenger traffic related factors values between districts

| 相关因素 | 客运方式 | 配对站点 | | | | | | |
|----------------------|------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 | 2-3 |
| t'_{ij}/min | 公路 | 25 | 35 | 25 | 70 | 85 | 90 | 40 |
| | 轨道 | 20 | 24 | 25 | 60 | 80 | 240 | 45 |
| | 私家车 | 15 | 30 | 20 | 50 | 60 | 85 | 35 |
| 相关因素 | 客运方式 | 配对站点 | | | | | | |
| | | 2-4 | 2-5 | 2-6 | 2-7 | 3-4 | 3-5 | 3-6 |
| t'_{ij}/min | 公路 | 45 | 94 | 110 | 125 | 15 | 30 | 65 |
| | 轨道 | 50 | 70 | 90 | 255 | 15 | 65 | 80 |
| | 私家车 | 40 | 55 | 65 | 70 | 10 | 20 | 47 |
| 相关因素 | 客运方式 | 配对站点 | | | | | | |
| | | 3-7 | 4-5 | 4-6 | 4-7 | 5-6 | 5-7 | 6-7 |
| t'_{ij}/min | 公路 | 73 | 30 | 42 | 67 | 20 | 53 | 47 |
| | 轨道 | 145 | 70 | 80 | 135 | 20 | 120 | 115 |
| | 私家车 | 65 | 26 | 40 | 80 | 15 | 65 | 60 |
| 广义出行费用函数形式 | | $U(q'_{ij}) = a(q'_{ij})^b + \alpha_1 t'_{ij} + \alpha_2 P'_{ij}$ | | | | | | |

注:以上来自大连交通局官方网站以及相关计算的近似值

由于城市内各站点间各种客运方式的舒适度、安全性等因素是相通的,因此在计算广义出行费用时,省略后面一项 c'_{ij} 。广义出行费用函数中,通过大连市客运交通数据统计分析分别设定参数值如表4.7:

表 4.7 参数取值

Tab.4.7 parameter values

| a | b | α_1 | α_2 |
|-----|-----|------------|------------|
| 3 | 0.4 | 0.3 | 0.4 |

4.4.2 模型求解

当客运广义出行费用相关因素值以及相关参数确定后, 得到可行线路两点之间的广义出行费用函数, 将广义出行费用函数以及 4.2 节的可行线路两点之间客运需求量, 代入下层均衡配流模型, 用 Lingo 软件进行编程求解。

令扰动参数 $P_{ij}^0=0, (i, j \in N, i \neq j)$, 对模型 U (2) 进行求解, 得到公路客运需求量与票价之间的线性关系式, 将下层均衡配流模型所得的公路客运需求量与票价之间的线性关系带入上层规划模型。

下面以大连市老城区与开发区之间的下层均衡配流模型为例介绍具体的求解, 便于对编程的理解。

老城区与开发区之间的客运相关因素如表 4.8:

表 4.8 老城区与开发区之间客运相关因素值

Tab.4.8 passenger traffic related factors values volume between 1 and 4

| 客运方式 | 公路 | 轨道运输 | 私家车 |
|----------------------|----|------|-----|
| t'_{ij}/min | 25 | 25 | 20 |

将表 4.7 和表 4.8 的数据代入旅客广义出行费用函数, 得到函数具体形式如下:

$$U(q, P) = \begin{bmatrix} 3(q^1)^{0.4} + 0.3P^1 + 1 \\ 3(q^2)^{0.4} + 0.3P^2 + 1 \\ 3(q^3)^{0.4} + 0.3P^3 + 0.8 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

令票价 $P^1 = P^2 = P^3 = 0$, 代入 (4.1) 式以及下层规划模型 L (2.1) 得到客流

量的初始解为

$$q^{10} = 7140, \quad q^{20} = 10318, \quad q^{30} = 4760$$

$$\text{设} \quad U(q, P) - \mu(P) = 0 \quad (4.2)$$

$$q_{14} = q^1 + q^2 + q^3 = 22218 \quad (4.4)$$

$$y(P) = [q(P), \mu(P)] \quad (4.5)$$

式(4.2)和(4.3)分别对(4.4)和 q^i 求雅克比矩阵,如下:

$$J_y(P) = \begin{bmatrix} 1.2 \frac{1}{(q^1)^{0.6}} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1.2 \frac{1}{(q^2)^{0.6}} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1.2 \frac{1}{(q^3)^{0.6}} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$J_p(P) = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

将初始解代入式(4.6),通过计算可得

$$\nabla y(P) = [J_y(P)]^{-1} [-J_p(P)] = \begin{bmatrix} -150.72 & 28.02 & 45.86 \\ 28.02 & -76.11 & 58.80 \\ 45.86 & 58.80 & -189.90 \\ 0.67 & 0.52 & 0.47 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

代入公式(3.26)得到多种客运方式下客流量与票价之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} q^1(P) \\ q^2(P) \\ q^3(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7140 \\ 10318 \\ 4760 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -150.72 & 28.02 & 45.86 \\ 28.02 & -76.11 & 58.80 \\ 45.86 & 58.80 & -189.90 \\ 0.67 & 0.52 & 0.47 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^1 \\ P^2 \\ P^3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

由于轨道交通以及私家车的票价确定后,变动不大,这里取 $P^2 = 5, P^3 = 15$,

将式(4.9)代入上层规划模型得到新的公路客运票价 P^{11} ,再次将票价(P^{11}, P^2 ,

P^3) 代入下层均衡配流模型, 如此迭代, 直到 $|P_{14}^{l,k+1} - P_{14}^{l,k}| \leq \varepsilon$ 。

将所有站点间的客流量与平均票价之间的关系求出后代入上层模型, 反复计算, 得到大连市公路客运主干线网优化以及站点间最优票价和公路客运分担客流量如表 4.9 和表 4.10。

表 4.9 大连市公路客运主干线网优化结果

Tab.4.9 setting plan of truck route in 2015

| 序号 | 班线编号 | 连接站点 | 班次 | 配置车辆 |
|----|--------|---------|-----|------|
| 1 | $h=1$ | 1-2 | 322 | 51 |
| 2 | $h=2$ | 1-3 | 271 | 31 |
| 3 | $h=3$ | 1-4 | 486 | 54 |
| 4 | $h=4$ | 1-5 | 147 | 37 |
| 5 | $h=5$ | 1-6 | 77 | 27 |
| 6 | $h=6$ | 1-7 | 121 | 69 |
| 7 | $h=8$ | 1-3-5-6 | 1 | 1 |
| 8 | $h=13$ | 2-3 | 18 | 15 |
| 9 | $h=14$ | 2-4 | 50 | 13 |
| 10 | $h=15$ | 2-5 | 6 | 3 |
| 11 | $h=16$ | 2-6 | 3 | 8 |
| 12 | $h=17$ | 2-7 | 1 | 1 |
| 13 | $h=19$ | 2-1-4 | 1 | 1 |
| 14 | $h=22$ | 2-3-5 | 3 | 3 |
| 15 | $h=24$ | 3-4 | 235 | 6 |
| 16 | $h=25$ | 3-5 | 53 | 9 |
| 17 | $h=26$ | 3-6 | 5 | 2 |
| 18 | $h=27$ | 3-7 | 5 | 3 |
| 19 | $h=28$ | 3-5-6 | 1 | 1 |
| 20 | $h=32$ | 4-5 | 49 | 10 |
| 21 | $h=33$ | 4-6 | 53 | 15 |
| 22 | $h=34$ | 4-7 | 56 | 29 |
| 23 | $h=37$ | 5-6 | 164 | 16 |
| 24 | $h=38$ | 5-7 | 14 | 6 |
| 25 | $h=39$ | 5-6-7 | 1 | 1 |
| 26 | $h=40$ | 6-7 | 16 | 6 |

表 4.10 站点间公路客运平均票价与分担客流量

Tab.4.10 passenger traffic average price and flow volume between districts

| | 配对站点 | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 | 2-3 |
| q_{ij} | 8531 | 5561 | 8443 | 4479 | 2538 | 278 | 359 |
| P_{ij} | 3 | 5 | 5 | 8 | 10.5 | 26 | 6 |
| | 配对站点 | | | | | | |
| | 2-4 | 2-5 | 2-6 | 2-7 | 3-4 | 3-5 | 3-6 |
| q_{ij} | 1806 | 224 | 116 | 13 | 2572 | 1482 | 229 |
| P_{ij} | 8 | 11 | 13 | 20 | 2 | 4 | 6 |
| | 配对站点 | | | | | | |
| | 3-7 | 4-5 | 4-6 | 4-7 | 5-6 | 5-7 | 6-7 |
| q_{ij} | 163 | 1538 | 1989 | 1689 | 6318 | 525 | 526 |
| P_{ij} | 6 | 5 | 7 | 9 | 5 | 18 | 8 |

4.5 优化结果评价

随着城市轨道交通的建设以及公路网的不断完善，大连市未来城市客运向着多模式综合客运体系发展。大连市城市公路客运主干线网的规划是在多种客运方式竞争的条件下去进行的，充分考虑了客运方式的分流特点，以客运整体效益最大为目标，实现客运资源的合理配置。

通过大连市公路客运线网双层规划模型的求解结果发现大连市未来公路客运有以下几个特点：

(1) 以起终点最短路径作为两点间的可行线路进行优化，所得到的票价比现在的价格普遍偏低，这是由于票价与客流量之间存在着一定的关系，旅客对各种交通方式具有选择权，这样更加有利于旅客的出行；

(2) 大连市公路客运主干线两个站点之间的客运方式以直达客运为主，这表明随着大连市轨道交通的建设，鉴于快速性、方便性等特点，短距离客流选择轨道交通出行，对于公路客运主干线的长距离运输，其在票价、速度以及舒适度等

方面的优点，成为长距离客流的主要出行方式；

(3) 本文建立的模型又使公路客运企业在满足客运需求的前提下实现利润最大化，算例中，大连市的公路客运供给与需求之间达到了平衡，同时实现公路客运企业的利润最大化。

(4) 多种客运方式，一种交通方式的不同的运营模式有利于旅客的出行，各种客运方式应合理地制定票价。本模型还可以通过变动轨道客运的票价，检查票价变动时，各种客运方式的客流分配以及利润情况，这样政府以及客运部门可以根据客运需求，对客运资源进行整体的优化。

在多种客运方式中，公路客运企业不能盲目投入运力，造成供大于求的情况，出现运力的浪费的现象；也不能随意抬高或降低票价，进行不公平竞争，造成客运市场的混乱。为了实现客运资源的合理配置以及客运市场的有序竞争，达到供需平衡等目的，这就需要政府对公路客运企业进行宏观调控，本文模型求解结果为政府对客运票价的管理以及客运企业对客运资源的配置提供了参考。

第5章 结论

城市公路交通是实现旅客出行的重要手段,是我国旅客运输中最主要、最基本的客运方式。随着综合旅客运输体系的发展,根据各种客运交通方式的规划与发展情况,对公路客运线网进行实时动态的规划,有利于公路客运企业对公路客运资源的合理有效的配置,有利满足旅客的出行。同时,也有利于政府等相关部门对公路客运市场的管理。城市公路客运线网的规划需要政府管理部门、公路客运企业共同努力,兼顾客运服务供需双方的利益,实现客运交通系统整体效益最大化。

本文采用“先布线,后优化”的方法,首先确定起终点之间的可行线路,再应用公路客运线网双层规划数学模型进行求解优化。该方法适用于拥有多种客运方式的大中型城市,大连市轨道交通正处于蓬勃建设中,该方法对未来大连市城市综合运输体系完善后,公路客运交通的规划具有指导意义,同时为“公路客运公交化”,“城乡客运一体化”奠定基础。本模型具有如下特点:

(1) 横向方面,综合考虑了公路客运企业与旅客的利益,实现公路客运系统整体效益最大化;

(2) 纵向方面,考虑不同客运方式之间的客流分配,根据各种客运方式竞争条件下的客流量分配结果进行实时动态优化,更加符合实际;

(3) 优化结果为政府交通客运管理部门以及客运企业合理设置线路,规划班次以及在不同时期合理制定旅客票价提供定量的依据;

(4) 模型求解采用基于灵敏度分析的启发式算法,应用 Lingo 软件进行编程求解,避免了使用遗传算法进行编程求解的复杂性。

通过大连市公路客运主干线的规划实例,证明了模型的实用性、合理性。实例所得到的方案基于实践,符合实际。由于所得票价是供未来公路客运班线制定票价时作参考,因此模型只对两点间的可行班线的平均票价进行估计,没有得到具体的各可行班线的票价。

公路客运线网双层规划模型是在总结以往规划方法的基础上建立的,它是以动态的客运需求为依据对公路客运资源进行配置,改变了以往静态规划的弊端,具有一定的优势。但上层模型有待于进一步细化,也可以根据其他客运方式的特

点建立各自的优化模型，或者建立整体的客运线网规划模型；另外，上下层模型
的软件编程与求解方面也有待于进一步的研究。

参考文献

- [1]交通运输部道路运输司. 道路运输业“十二五”发展规划纲要. 2010.
- [2]王生昌, 白韶波等. 公路客流量预测方法的比较. 长安大学学报, 2005 (9): 83-85
- [3]姚新胜, 罗霞等. 公路旅客运输运力配置现状即趋势分析. 公路与汽车, 2010 (1): 66-68
- [4] 孙艳丰. 基于遗传算法的城市交通运输网络优化问题研究. 系统工程理论与实践, 2000(3): 25-28
- [5] CederA, WilsonN. Bus network design. Transportation ResearchB, 1986, 20(4): 31-44
- [6]Lampkin, Saalmans. The Design of Routes, Under taking: A Case Study. Transportation Research, 1967, 34(2): 123-127
- [7] Hirsch, Dantzig. The Fixed Charge Problem. RandCo, 1968, 3(11): 16-2912
- [8] Pattnail,S.B. Urban bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm. Journal of Transportation Engineering, 1998, 12(4): 368-375
- [9] BaajM.H, Mahlnassani H.S. Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. Transportation Research C, 1995(3): 31-50
- [10]David Sullivan, AlastairMorrison. Using Desktop GIS for the Investigation of Accessibility by Public Transport AnIsochrone's Approach. Geographical InfonnationScience, 2002, VOI. 14 No. 1
- [11]王志栋. 公交线网优化模型的建立. 大连铁道学院学报, 1997 (4)
- [12]王炜. 实用公交线网规划方法研究. 1990
- [13]林柏梁, 杨富社. 基于出行费用最小化的公交网络优化模型. 中国公路学报, 1999 (12): 79-83
- [14]韩印. 城市公共交通线网优化: (硕士学位论文). 长春: 吉林工业大, 1994
- [15]于滨, 杨忠振. 并行蚁群算法在公交线网优化中应用. 大连理工大学学报, 2007, 47 (3): 211-214
- [16]Gao Z Y and Sun H J. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. Transportation Research-B, 2002
- [17]赵彤, 高自友. 城市交通网络设计问题中的双层规划模型. 土木工程学报, 2003 (1): 6-7
- [18]高自友, 宋一凡. 连续平衡网络设计问题双层规划模型及其求解方法. 公路交通科技, 1999

(4)

- [19]高自友,张好智. 城市交通网络设计问题中双层规划模型、方法及应用. 中国公路学报, 2004(2)
- [20]四兵峰,高自友. 铁路旅客票价与客流量之间的灵敏度分析. 铁道学报 1999 (8): 13-16
- [21]四兵峰,高自友. 城市间公路客运的客票票价与其流量之间的灵敏度分析. 中国公路学报, 2000(2): 91-95
- [22] 令狐燕. 公路客运班线配置研究: (硕士学位论文). 成都: 西南交通大学, 2004
- [23] 凡亚军. 公路客运线网规划研究: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2010
- [24] 龚国清. 道路客运班线规划与管理研究: (硕士学位论文). 长沙: 长沙理工大学, 2004
- [25]谢新连,王少成等. 一种公路客运线网优化设计方法: (大连海事大学学报). 2009 (11): 59-62
- [26]王强. 我国道路客运班线管理问题研究: (硕士学位论文). 长安: 长安大学, 2007
- [27] 交通部道路旅客运输及客运站管理规定. 2005
- [28]陈贻龙,邵振一. 运输经济学. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [29] 郝勇刚. 常规公交线网优化双层规划模型研究——以南昌市为例: (硕士学位论文). 广州: 华东交通大学, 2008
- [30]王炜等著. 城市交通管理规划指南. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [31] 唐小我. 现代组合预测和组合投资决策方法及应用. 科学出版社, 2003
- [32] 毛保华等著. 交通规划模型及其应用. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- [33] Tschangho John Kim, Sunduck Suh. Advanced Transport and Spatial System Model. Application OT Korea. Springer-Verlag, NewYork, 1990
- [34]李旭. 道路交通规划. 江苏: 东南大学出版社, 1997
- [35]郭致政,姜梅. 点-域匹配的公交主干线网规划方法. 交通运输工程学报, 2008 (12): 77-79
- [36] 陈建华,高自友. 基于双层规划模型的铁路票价优化策略. 北方交通大学学报, 2003 (9): 38-40
- [37] Beckmann, McGuire, Winsten. Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press Translation, 1955
- [38]Yang Hai. Sensitivity Analysis for the Elastic-Demand Network Equilibrium Problem with

Applications. Trans. Res. B, 1997

[39] Sheffi Y. Urban Transportation Network: Equilibrium analysis with mathematical programming methods. Prentice-Hall, INC, , Englewood Cliffs, New Jersey, , 1985

[40] TOBIN R L, FAICCO A V. Sensitivity analysis for variational inequalities. Journal of Optimization Theory and Application, 1986, 48(1)

[41]大连市统计局. 2010年《大连统计年鉴》. 北京: 中国统计出版社, 2000-2010

[42]<http://www.dlky.dl.gov.cn/bmfw/ctky1/ly.asp>

[43] <http://www.stats.dl.gov.cn/>

[44]王少成, 凡亚军, 杨秋萍.大连市域内公路长途客运主要班车线网优化研究. 公路, 2009(10): 171-175

[45]常玉林, 胡启洲.城市公交线网优化的线性模型. 中国公路学报, 2005 (1): 95-98

攻读学位期间发表论文

[1]林武强,王岩磊,王英娇,邢恩普,谢新连. 基于证据推理法的舰船维修级别分析方法. 军船学委会完好性学组第四次工作会(宁夏),2010. 9

致 谢

首先，感谢我的导师谢新连教授，两年的研究生学习，导师不仅教会了我学习的方法，更重要的是做事的方法和做人的道理。谢谢您！在此祝您身体健康，工作顺利！

然后，我要感谢我的父亲、母亲，谢谢你们这么多年的支持，是你们在我做出每一个决定时默默的支持着我！爸爸妈妈辛苦了！

最后，我要感谢我的同学和朋友，谢谢你们在学校期间的大力支持，祝你们的未来绚烂辉煌！

谨以此文献给所有关心我、支持我和帮助我的人！谢谢你们！

