

分类号_____

密级_____

U D C _____

编号_____

華東交通大學

学术硕士学位论文

基于大客流优先分配法的高速铁路 列车停站方案优化

学位申请人： 任逸飞

学 科 专 业： 交通运输规划与管理

指 导 老 师： 查伟雄 教授

答辩日期：2022 年 5 月 28 日

华东交通大学2022届学术硕士学位论文

基于大客流优先分配法的高速铁路列车停站方案优化

交通运输工程学院

任逸飞

华东交通大学学位论文独创性声明（硕士用）

学 院	交 通 运 输 工 程 学 院	专 业	交 通 运 输 规 划 与 管 理	学 号	201913808230 3005
论文题目	基于大客流优先分配法的高速铁路列车停站方案优化				

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写的研究成果，也不包含为获得华东交通大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人签名 任雄飞 日期 2022.5.28

关于论文授权使用说明

本人完全了解华东交通大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

保密的论文在解密后遵守此规定，本论文无保密内容。

本人签名 任雄飞 导师签名 查伟雄 日期 2022.5.28

基于大客流优先分配法的高速铁路列车停站方案优化

摘要

近年来旅客在中长距离出行方式的选择上更偏向于高速铁路，所以想要吸纳更多的旅客以增强高铁核心竞争力，就必须优化列车停站方案使之更加适应乘客需要。高速铁路列车停站方案作为其开行方案的重要组成部分在铁路运输组织中扮演着十分重要的角色。因为线路覆盖范围、车站服务水平、旅客出行需求等方面都是列车停站方案优化过程中不可避免的影响因素，所以列车停站方案优化问题是一个具有多个复杂约束条件的多目标优化问题，求解难度大。高速铁路列车停站方案的好坏直接对旅客的出行效率和运营部门的管理收益产生影响。

本文对以往学者对列车停站方案优化以及高速铁路客流分配方法的研究进行了大量的阅读，并对其进行总结和概括，并结合目前高速铁路列车停站方案研究中存在的问题和需要改进的地方进行研究。结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点，根据乘客对列车的选择方式，即乘客会选择在途时间最短的列车，提出了一种适用于铁路的客流分配方式，并命名为大客流优先分配法。建立了以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标，满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束的多目标高速铁路列车停站方案优化模型，并设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解。

最后，通过对京沪高铁的实例研究表明，优化后列车停站方案的总停站次数降低了 7.92%，列车空费能力降低了 19.84%，旅客损失时间降低了 41.52%。本文的研究成果可为列车停站方案的制定提供合理参考。

关键词：铁路运输，停站方案，客流分配，多目标优化，遗传算法

Optimization of High-speed Railway Train Stopping Scheme Based on Large Passenger Flow Priority Allocation Method

ABSTRACT

In recent years, passengers are more inclined to high-speed railways in the choice of medium and long-distance travel. Therefore, in order to attract more passengers to enhance the core competitiveness of high-speed railways, it is necessary to optimize the train stop plan to better meet the needs of passengers. As an important part of its running plan, the high-speed railway train stop plan plays a very important role in the railway transportation organization. Because line coverage, station service level, and passenger travel demand are all unavoidable factors in the optimization process of the train stop plan, the train stop plan optimization problem is a multi-objective optimization problem with multiple complex constraints. It is difficult to solve. The quality of the optimization of the high-speed railway train stop plan directly affects the travel efficiency of passengers and the management income of the operating department.

This paper has done a lot of reading on the previous scholars' research on the optimization of the train stop plan and the passenger flow distribution method of the high-speed railway, and summarized and summarized them, combined with the problems existing in the current high-speed railway train stop plan and the areas that need to be improved research. Combining the characteristics of railway transportation "driving according to the flow" and the priority of large passenger flow, according to the passenger's choice of trains, that is, passengers will choose the train with the shortest transit time, a passenger flow distribution method suitable for railways is proposed and named as large passenger flow. Passenger flow priority allocation method. The goal is to minimize the total number of train stops, the minimum train empty capacity, and the minimum passenger time loss, and to meet the constraints of passenger flow, train transportation capacity, the number of stops per train, departure, arrival and stop at key stations. Constrained multi-objective optimization model of high-speed railway train stop plan, and designed a genetic algorithm with ideal point method as fitness function to solve it.

Finally, the case study of the Beijing-Shanghai high-speed railway shows that the total number of stops of the optimized train stop plan is reduced by 7.92%, the empty capacity of the train is reduced by 19.84%, and the lost time of passengers is reduced by 41.52%. The research results of this paper can provide a reasonable reference for the formulation of the train stop plan.

Key Words: Railway transportation, stop plan, passenger flow distribution, multi-objective optimization, genetic algorithm

目录

主要符号说明.....	I
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 国内研究现状.....	2
1.3.2 国外研究现状.....	5
1.3.3 研究现状综述.....	7
1.4 主要研究内容及技术路线	7
1.4.1 主要研究内容.....	7
1.4.2 技术路线.....	8
1.5 本章小结	9
第二章 相关理论基础.....	11
2.1 高速铁路列车开行方案	11
2.1.1 高速铁路特点.....	11
2.1.2 高速铁路列车开行方案组成部分	11
2.1.3 高速铁路列车开行方案编制流程.....	12
2.2 高速铁路列车停站方案	13
2.2.1 停站方案的含义.....	13
2.2.2 停站方案的模式.....	14
2.2.3 停站方案组合模式.....	17
2.3 客流分配	18
2.3.1 客流分配的基本方法.....	18
2.3.2 高速铁路客流分配方式分析.....	19
2.3.3 用户均衡定理不适用于高速铁路客流分配的证明.....	20
2.4 本章小结	21
第三章 高速铁路列车停站方案建模分析.....	22
3.1 列车停站方案影响因素	22
3.1.1 客流需求.....	22
3.1.2 基础设施能力.....	22
3.1.3 服务水平.....	23
3.2 问题描述	24

3.3 模型假设	24
3.4 目标函数构成	25
3.4.1 停站总次数最少	25
3.4.2 列车空费能力最少	26
3.4.3 旅客时间损失最小	26
3.5 约束条件分析	26
3.6 模型分析	28
3.7 本章小结	29
第四章 高速铁路客流分配方法与优化算法设计	30
4.1 大客流优先分配法	30
4.1.1 客流分配模型	30
4.1.2 客流分配算法步骤	31
4.2 遗传算法	33
4.2.1 遗传算法简介	33
4.2.2 理想点法	34
4.2.3 遗传算法步骤	35
4.3 本章小结	39
第五章 算例分析	40
5.1 京沪高铁基本情况	40
5.2 数据准备	40
5.3 计算过程	44
5.4 结果分析	48
5.5 本章小结	48
第六章 结论与展望	50
6.1 主要工作内容与结论	50
6.2 创新点	51
6.3 研究展望	52
参考文献	53
个人简历 在读期间发表的学术论文	57
致谢	58

主要符号说明

A	线路起点站
B	线路终点站
l_1, l_2	为 A, B 之间的两条路径
t_1, t_2	两条线路的阻抗函数
c_1, c_2	l_1, l_2 中开行列车的定员
q_1, q_2	各条路径负载客流量
q	A 地到 B 地的总客流量, q 已知且 $q_1+q_2=q$
S	某高速铁路线路上的车站集
S_i	某高速铁路线路上的站点
n	线路上的车站总数
T	线路中的列车集
T_k	线路上开行的列车
m	线路上的列车总数
G_k	高速铁路列车编组辆数
c_k	列车 T_k 的额定载客量
$x_{k,i}$	描述列车 T_k 在车站 S_i 停与不停两种情况
s_k	列车 T_k 的始发站
e_k	列车 T_k 的终到站
D_k	列车 T_k 运行距离
$d_{i,j}$	车站 S_i 和车站 S_j 之间的距离
$q_{k,i,j}$	列车 T_k 上从车站 S_i 到车站 S_j 的旅客数量
$q_{i,j}$	从车站 S_i 到车站 S_j 的客流量
$\xi_{r,i,j}$	表示区间 r 是否在车站 S_i 和车站 S_j 之间
W_1	列车 T_k 的最小规定停站次数
W_2	列车 T_k 的最大规定停站次数
v_k	列车 T_k 的重点车站
R_k	列车 T_k 的开行区段
C	OD 矩阵中的元素
$q_{k,r}$	列车 T_k 在区间 r 里的旅客数量
T_1	部分列车组成的集合

D	停站数总和矩阵的第二列元素
E	D 中的最小值
F	列车运营里程矩阵的第二列元素中的最小值
G	额定客流量减去途径各区间的载客量
H	G 中的最小值，也是具体加载到各列车上的人数
$q_{i,j}'$	更新后返回 OD 矩阵中的客流量
f_i^*	第 i 个目标值的最优解

第一章 绪论

1.1 研究背景

1964 年,日本自主修建的全世界首条高速铁路——东海道新干线正式开始运行。这条铁路的起点为东京,终点为大阪,运营里程 515 公里,每小时的行驶里程为 230 公里。作为当今世界上首条高速铁路,它开启了世界高速铁路建设的新时代。东海道新干线具有高速铁路快捷、方便、安全系数和舒适程度较高等独特的优点,吸引了全世界的瞩目^[1]。紧接着法国也着手研究本国的高速铁路技术,在 1981 年修建了巴黎—里昂高速铁路,它也是欧洲第一条高速铁路。随后,其他欧洲发达国家也陆陆续续开始修建高速铁路,引发了全世界范围内的高速铁路修建的风潮^[2]。

21 世纪以来,我国高速铁路发展速度迅猛。目前,我国投入使用的高铁线路主要有京沪、京津、武广、郑西等,这些线路构成的高速铁路网是全球覆盖范围最广且运营里程最长的^[3]。随着国民经济的发展、人民生活水平的日益提高以及居民消费理念的转变,人们对出行数量和品质的需求都发生了翻天覆地的改变。由于高速铁路有行驶速度快、载客量大、安全程度高及出行条件好等优点,逐渐成为了当代旅客最喜爱的一种出行方式。

但由于高速铁路覆盖范围的逐渐增大,客流需求日益变动,组织高速铁路运营工作的复杂程度也日益增大^[4]。所以,在满足日益变动的客流需求的基础上,如何将各种运力资源更为合理且科学经济的分配是运营部门必须解决的重大问题^[5]。

列车开行方案是高速铁路运输组织中最关键的内容,它不仅能够体现旅客运输的服务质量,还能反映出组织管理水平的高低。而列车停站方案又是开行方案的重要子集。良好的列车停站方案需要协同考虑旅客出行时间、列车停站次数和运营部门经济收益等方面。综上所述,怎样在满足高铁客流需求的前提下,结合各种停站方案影响因素制定出更科学合理的列车停站方案,从而进一步提升客运服务质量和运营部门的效益是运营部门必须研究的课题。

1.2 研究意义

现如今,运输市场越来越呈现多样化的趋势,同时随着各地的经济不断发展,居民生活质量不断提高,人们对出行的需求也发生了巨大的改变。编制出符合我国实际情况的高速铁路运输组织工作来满足新的生产力配置和运输市场条件,有助于我国高速铁路的发展^[6]。

近年来,我国的高速铁路客运量呈现阶梯化增长的趋势,人们的出行需求日益增长,造成了客流需求与运输能力的供需不平衡,这就需要铁路运输部门调整列车开行方案和

停站方案，以更好的满足人们日益增长的出行需求。

在高速铁路运营管理中，列车开行方案的制定是最关键的部分，如何制定出合适的方案是运营部门必须解决的重大问题^[7]。但由于开行方案受到很多因素的影响，所以，要先将开行方案拆分成几个部分分别优化，然后运用循环迭代的思想为指导，得到整个问题的最优解，就可以化繁为简，成功的解决这一问题^[8]。而列车停站方案又是开行方案的重要子集，它的好坏直接影响到列车开行方案，进而对旅客的出行效率和运营部门的管理收益产生影响。

因此，在我国高速铁路快速发展和旅客运输市场竞争日益加剧的前提下，对高速铁路列车停站方案进行优化研究有着十分重要的意义，主要有以下两个层面的意义：

(1) 系统的研究我国高速铁路列车停站方案优化方案，不仅能够充实我国高速铁路运输组织的理论，还为高速铁路列车停站方案的实际运用奠定了科学的理论基础。

(2) 良好的列车停站方案需要协同考虑旅客出行时间、列车停站次数和运营部门经济收益等方面。它能满足客流需求，改善客运服务水平，还对提高铁路运输部门的运营效益，推动铁路运输企业市场化改革产生有利影响。

1.3 国内外研究现状

如上所述，列车停站方案是列车开行方案的一个不可或缺的部分。此外，停站方案的优化也需要跟客流需求相匹配。本文将以往学者在相关领域的文献分为开行方案优化的研究、停站方案优化的研究及客流分配的研究这三个部分并且从国内外两个方面进行总结和概括。

1.3.1 国内研究现状

(1) 开行方案优化模型及算法研究

我国最初的停站方案优化研究并没有从开行方案优化研究中独立出来，针对其做单独的研究，都是作为开行方案优化研究的一部分来进行研究。因此我国最初的研究大多结合开行方案优化研究一起进行。

张拥军^[9]研究了停站时间对开行方案的影响，建立了开行方案优化模型以求使得停站时间最小、动车组载客虚糜程度最低，并且使用有序组合数法对其求解。

查伟雄^[10]运用二分图的最大匹配权问题来解决直通旅客列车开行方案优化问题，并获得令人满意的结果。

何宇强^[11]等首次将双层规划理念引入列车开行方案优化问题的求解中。上层为企业运营收益最大和旅客便捷程度最高的双目标模型，下层为用户均衡模型，采用混沌算法得出最优解。

史峰^[12]分析总结了目前国内高速铁路的开行方案设计情况和实际运营状况，构建适用于路网运营的列车开行方案双层规划模型，求解算法选择了模拟退火算法。

徐行方^[13]进行了实地调研,他设计的开行方案模型中的列车运行区段、列车的数量、停站方案等都得到了很好的平衡,对于停站方案的优化,以停站比例为目标建立了模型,并且用沪宁城际轨道交通的算例对模型进行验证。

(2) 停站方案优化模型及算法研究

通过比较前人对于列车开行方案优化的研究,有的学者认为有必要对于开行方案设计中的重要环节——列车停站方案进行单独的研究。在列车停站方案优化研究中,使用的模型主要是多目标优化模型,算法主要是遗传算法、模拟退火算法等。

陈虎^[14]对列车停站方案国内外研究现状进行了总结和归纳。认为应该在充分考虑路网条件的情况下,进行高速铁路旅客列车的停站方案的设计,制定出的停站方案更加科学合理并且对铁路运输企业产生巨大的效益。

黄鉴^[15]提出了两阶段优化算法,以提高高速列车停站优化问题的求解速度。第一阶段为初步优化阶段,第二阶段为综合优化阶段。

冯亮^[16]基于沪宁铁路客运在时间上的分布特点、各站点的客运需求辐射范围和服务质量,来制定了各站点的列车运行停站间隔时间,定义了各站点的服务水平层次和服务间距,并对比了既有列车运行停靠站的方案,提出了沪宁基于高峰和平峰时不同服务间距的省会城市城际列车行停站优化方案和服务改善建议。

赵洪诚^[17]引入可达性定义以解决列车停站方案中的接驳问题,构建优化模型使路网内可达性最大,提出单亲遗传算法,并研制列车运行图自动铺绘软件。

徐斌^[18]构建出的多目标优化模型使旅客出行时间损失最小并且列车区间内的平均上座率得到平衡,在模型求解时使用了遗传算法。

冯旭杰^[19]提出了列车牵引能耗的计算方法。为了改善列车牵引能耗的测算方法,加入机械效率的概念。建立停站方案的优化模型实现列车牵引能耗最小和运行时长最短,并用沪杭高速铁路的算例验证模型的有效性。

李得伟^[20]提出节点服务频率的概念,并制定不同等级车站对应的节点服务频率大小,建立停站方案优化模型来实现最少总停站次数。

吕红霞^[21]基于列车停站模式的特点将可行解集分割成许多子集,通过遗传算法对子集根据特点依次求解。用仿真方法证明模型的有效性。

牛丰^[22]引入不确定变量描述客流的变化,构造了不确定客流条件下高速铁路列车停站方案优化模型以使总停站次数最小。

黄林尧^[23]构建了节点重要度评价指标体系,划分高速铁路客运节点等级。搭建以乘客损失时长最小、列车空费能力最小、总的停站次数最少为目标函数的高速铁路列车停站方案优化模型。

张小炳^[24]充分考虑了列车停站次数的稳定性和站点间的可达性,构建了高速铁路列车停站方案的优化模型。对模拟退火算法进行改进,使其具有自适应性,更贴合于模型特点。

赵杰群^[25]根据客流不断变化的特点,构建以列车停站所耗的费用最少作为目标函数的基于单次列车停站费用的高铁列车停站方案优化模型。运用序列二次规划算法对模型进行求解和结果分析。

张旭^[26]对丹大城际铁路进行研究分析,以运营组织的经济效益最大、乘客候车所需要的时间最少及列车空费能力最小为目标建立优化模型,算法选取遗传算法。

毕明凯^[27]通过系统分析城郊铁路旅客出行需要,采用快慢车结合的方式对列车停站方案进行优化,建立以总运行时间最小为目标的城郊列车停站方案优化模型。

闫海峰^[28]将列车运行图铺画和列车停站方案优化结合,建立以列车总运行时间最短为目标的高速铁路列车停站方案模型。由于模型为离散模型,所以运用 LINGO 软件算法进行求解。

简星^[29]推导出相邻列车运行线之间的出发相差的计算公式。以区段内各个车站列车运行线总使用时长最小为目标函数构建停站方案优化模型,求解算法选择了模拟退火算法。

刘璐^[30]针对高速铁路旅客与普速铁路旅客的不同点,根据高铁旅客的出行要求,协同优化列车停站方案与列车运行图。运用拉格朗日松弛定理,对模型进行求解。

高明瑶^[31]构建了以铁路经济效益最大和旅客出行时间最小为目标函数的城际铁路列车停站方案优化模型,并利用理想点法作为遗传算法的适应度函数对模型进行求解。

许若曦^[32]认为应该使提高大站间快车数量和增加中小站车站服务频率之间的关系相平衡。构建列车停站方案优化模型以尽可能降低旅客由于站间换乘或者列车停靠而消耗的时间,在求解算法上使用了遗传算法。

张涛^[33]推导出始发站列车发车间隔的计算公式。构建以旅客出行所需时间最少为目标的优化模型,协同优化节假日时期的列车停站方案与运行图。基于模型特点设计遗传算法求解算例。

秦永胜^[34]根据车站等级的不同,在开行对数不变时,实现执行当日开行任务所需要的车底最少和旅客出行所耗用的时间最短的目标,建立了列车停站方案优化模型,在求解算法上选择了人工蜂群算法求解。

(3) 客流分配模型及算法方面研究

在客流分配方法方面,国内外学者也进行了深入研究。进行客流分配的方法早期是在先将旅客按照一定的规则预先分配到铁路路网上,这种方法没有考虑到旅客的自由选择的影响。后来研究者开始注意到旅客自由选择带来的影响,以及旅客出行选择列车服务行为,并进行了进一步研究。更多的学者开始对铁路方面的客流分配方法进行研究。

邓连波^[35]构建了列车停站方案优化双层规划模型,下层模型为 UE 客流分配模型,上层模型为以旅客旅行所消耗的费用和列车停靠站台的次数最少为目标的优化模型。在求解算法方面,选取了模拟退火算法。

聂磊^[36]构建了铁路列车路径网络,并设计基于用户选择的路径阻抗,从而构建了以

系统内部用户总出行费用最小为目标的客流分配模型，采取传统的 Frank-Wolfe 算法对模型进行求解。

佟璐^[37]分别建立了开行方案以及时刻表阶段以系统内部用户总出行费用最小为目标的客流分配模型，并设计了遗传算法对其进行求解。

豆飞^[38]构建了以系统内部用户总出行费用最小为目标的客流分配模型对开行方案客流分配进行研究，在求解算法上选取了组合熵优化算法。

王正彬^[39]以系统内所有用户出行成本最少的目标构建铁路线路网客流分配模型，在求解方法上使用 LINGO 软件进行求解。

赵烁^[40]根据旅客购票特征构建阻抗函数，建立客流分配模型，结合用户出行时间差异进而完成考虑售票策略的客流分配方法。

史峰^[41]认为高速铁路列车不存在饱和度大小问题，高铁的用户出行选择过程只有能选和不能选两种情况，不存在过渡关系，因此并不适用 UE 用户均衡定理。

倪少权^[42]构建以系统内用户出行成本最小为目标的拓扑网络模型。在客流分配的过程中选择了 K 短路算法，得到一个合理的客流分配结果。

李文卿^[43]认为目前的大多数针对高速铁路客流分配的研究所使用的寻路算法和 UE 配流算法，并不适用于高速铁路。他根据高速铁路用户实际出行选择，提出了一种新的“长客流分配”方法解决换乘和不换乘的客流分配问题。

蔡芸^[44]构建了双层规划模型，上层规划是达到列车运行的成本最少的目标的优化模型；下层规划运用了用户平衡模型。根据模型特征设计了遗传算法。

1.3.2 国外研究现状

国外铁路的发展比较早，所以管理经验较为丰富。例如德国、日本等对于本国高速铁路列车开行方案、停站方案已经进行了充分的研究，得到的研究成果也相对比较系统。

Eisele^[45]对城郊轨道交通列车停站方案用区域理论进行分析，对比分析了旅客出行所需要消耗的时间在站站停、间隔跨站停、区域停三种模式下的不同表现，其结果表明区域停站模式下大站间客流所消耗的时间最短，减小了对旅客所造成的时间不必要耗费的影响。

Ghoneim^[46]也参考了区域理论，设定约束条件，对城郊通勤铁路列车停站方案优化模型进行优化，此优化模型是以最小乘客总出行时间、最大企业管理经济效益为目标函数。

Sone^[47]在基于 Eisele 和 Ghoneim 等研究的基础上进行进一步的深入研究，他发现区域停站模式在具有多条线路服务一个车站特点的线路上比较实用，而在其他类型的线路上适用性就不明显，相较于使用一种停站模式的方案，使用多停站模式的方案的适用性不局限于多条线路服务一个车站的特点，适应性更为广泛。

Michael^[48]优化了在实现提高列车中不换乘旅客的所占总人数的比例的目标函数的列车开行方案模型，并将其运用于德国铁路中，证实了模型可以实际运用中起到有利作

用。

Chang^[49]构建以运输管理成本和旅客总的出行所耗费的时间最小为目标的优化模型,他设计的开行方案优化模型协同优化了列车停站方案、开行对数以及客流分配。他的研究开创了开行方案的协同优化理论的先河。

Goossens^[50]使用了多种优化模型来优化高速铁路停站方案,模型以公司经营管理所需成本最小作为它的目标函数,将荷兰铁路网代入模型剖析。

Bum Hwan Park^[51]建立了固定及不固定列车停站模式下的开行方案优化模型,用于对列车停站模式如何影响经营管理效益的分析。用韩国高速铁路证明不固定停站模式相较于固定的停站模式的优化模型乘客出行所需要耗费的时间总和优化率高出将近四到五个百分点。

Jong^[52]等以乘客出行所耗费的总的时间长度最小为出发点,深入研究了列车的停站及决策支持系统,生成了最优化列车停站系统,采用遗传算法找到问题的最优的解。并且用台湾高铁证明他所构建的模型具有一定的实用性。

Yang^[53]通过考虑列车的到发间隔、列车追踪间距等约束因素,以列车停站顺序为决策变量构建了列车运行时刻和以旅客列车总晚点持续时间最小化为总体目标的多目标混合整数线性规划模式。

Carrizosa^[54]在目前站点的基础上构建了旅客出行所耗用时长最短为目标的列车停站站点选择模型,并用实际案例证明合理选择列车停站站点在一定程度上可以帮助缩短旅客总的在途时间。

Bum Hwan Park^[55]等将两个优化模型结合优化列车开行方案。第一步先确定列车开行区段和次数,他根据站站停模式构建了以列车总里程最短为目标的优化模型。第二步在先前优化的基础上,将旅客出行总共耗费的时间最短作为其目标函数建立优化模型,使得列车在中间站停靠的布置更为合理。

在客流分配方法方面, Wardrop 专家在 1952 年提出了网络平衡分配第一和第二定理,这也使得学者们开始关注交通流分配。目前许多国内外的学者对道路交通、城市轨道交通以及铁路交通等交通流分配模型和算法展开了大量的探索。

Cominetti^[56]使用 Wardrop 平衡客流分配模型来解决公交网络中出现的由于交通拥堵而对旅客出行造成的不必要损失的问题,采用动态规划的方法将客流合理分配。

Ho.H.W^[57]等为解决如何进行可客流分配的问题,建立了基于 Logit 的用户选择行为概率模型和协同旅客旅行方式以及交通流合理分配的模型。

Xu^[58]探究了公共交通时间表,建立了在容量被限制的条件下随机用户均衡模型。

Liu^[59]发现具有动态离散特征的公共交通网络下运行能力处于供小于求的状态,因此他建立了将能力约束和有限理性充分考虑的优化模型,在求解方法上使用了拉格朗日分解算法。

Pi Xidong^[60]等对于城市轨道交通客流如何分配的研究主要涉及到列车等级、列车安

全系数等影响因素。

1.3.3 研究现状综述

综上所述,对于高速铁路列车停站方案优化的研究,国内外已经取得了一定的成果,但尚存在一些问题,主要集中在以下方面:

(1) 现在学者在对停站方案进行研究时,大多研究对象是开行方案,他们在进行方案优化时,把对停站方案的优化视为开行方案优化的一个小点。通过求解经过处理后的列车停站问题,用最优停站方案去匹配列车备选集或者对开行对数进行循环迭代以求得最优开行方案。这种求解思路没有充分考虑到停站方案的其他影响因素所带来的影响。所以,为了弥补这一部分的缺陷将高速铁路停站方案单独作为研究对象是十分必要的。

(2) 目前大多数学者在进行铁路上的客流分配的过程中一般采用全有全无法、用户均衡模型或随机用户均衡模型,或将客流量当作约束条件考虑。

(3) 现有的研究在模型的多目标问题的处理方法上大多是采用了将设计的各优化目标函数进行加权处理,形成一个单一的目标。一般的权重赋值方法在处理此类问题是会受到主观因素影响,在处理问题的过程中偏向于其中一个目标,从而导致优化结果的不合理,这也使得最终优化后的结果存在很大的主观性,同时就会导致局部收敛。

因此,本文针对现有研究的不足,对高速铁路列车停站方案进行系统的研究。结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点,根据乘客对列车的选择方式,即乘客会选择在途时间最短的列车,提出了一种适用于铁路的客流分配方式,并命名为大客流优先分配法。将客流分配到每一列列车上,为停站方案制定、开行方案制定、客票分配等环节奠定基础。同时建立了以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标,满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束的多目标高速铁路列车停站方案优化模型,并设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解,通过实例证明了模型及算法的合理性。

1.4 主要研究内容及技术路线

1.4.1 主要研究内容

本文对高速铁路列车停站方案的优化问题进行研究。首先总结了国内外已有文献的研究结果,分析我国高速铁路列车停站方案研究的存在的不足之处,并且阐述了本文所使用的理论基础,构建出多目标的高速铁路列车停站方案模型,提出适用于高速铁路的客流分配方法,设计了适应度函数为理想点法的遗传算法,最后用京沪高铁的算例对模型和算法进行验证。

本文一共分为6个章节,第1章提出高速铁路列车停站方案优化研究的背景及意义并总结概括了研究现状,第2章结合本文的主要研究内容对所使用的理论和方法进行简要的概述,第3章建立高速铁路列车停站方案优化模型,第4章针对模型设计相关的客流分

配方法和遗传算法，第5章结合京沪高铁的算例对本文所建立模型和算法进行检验，第6章总结全文的研究成果并提出展望。

第1章：绪论。介绍进行列车停站方案优化研究的背景和意义，然后对已有国内外文献进行总结和概括，找出可以进一步研究的方向。最后，简述了本文的主要研究内容，形成论文的技术路线。

第2章：相关理论基础。主要从理论方面详细分析高速铁路列车开行方案的组成部分、高速铁路列车的停站种类及其组合模式的优势和不足及各种类型的模式在什么情况下适用；介绍传统交通量分配的基本方法以及论证传统客流分配方式不适用于高速铁路客流分配。

第3章：高速铁路列车停站方案建模分析。主要分析高速铁路列车停站方案的影响因素，对高速铁路列车停站方案进行数学描述，对建模的条件进行假设，构建高速铁路列车停站方案多目标优化模型。

第4章：高速铁路客流分配方法与优化算法设计。主要内容包括设计了一种适用于铁路的客流分配方法，并命名为大客流优先分配法；并设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法对高速铁路列车停站方案优化模型进行求解。

第5章：算例分析。利用上文建立的高速铁路列车停站方案优化模型，对京沪高速铁路停站方案进行优化，将优化后的结果与初始列车停站方案进行比较，证实本文设计的列车停站方案优化模型是具有实际的应用能力的。

第6章：结论与展望。对全文的研究工作进行总结和概括，总结了本文的研究成果并指出了本文尚且存在的不足和在以后的研究中所需要考虑的问题。

1.4.2 技术路线

本文首先介绍本文的研究背景及意义，总结了既有研究成果，并指出该方向上研究存在的不足的地方；其次从理论上分析高速铁路列车开行方案的组成部分、高速铁路列车停站方案内容、列车停站类型以及论证传统客流分配方式不适用于高速铁路客流分配；再次以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标，满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束，建立多目标高速铁路列车停站方案优化模型；然后结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点，根据乘客对列车的选择方式，即乘客会选择在途时间最短的列车，提出了一种适用于铁路的客流分配方式，并命名为大客流优先分配法。最后针对模型的特性，设计以理想点法作为适应度函数的遗传算法对模型进行求解，运用京沪高铁这一案例进行验证，得到京沪高铁一日最优列车停站方案。本文的技术路线如图 1-1 所示。

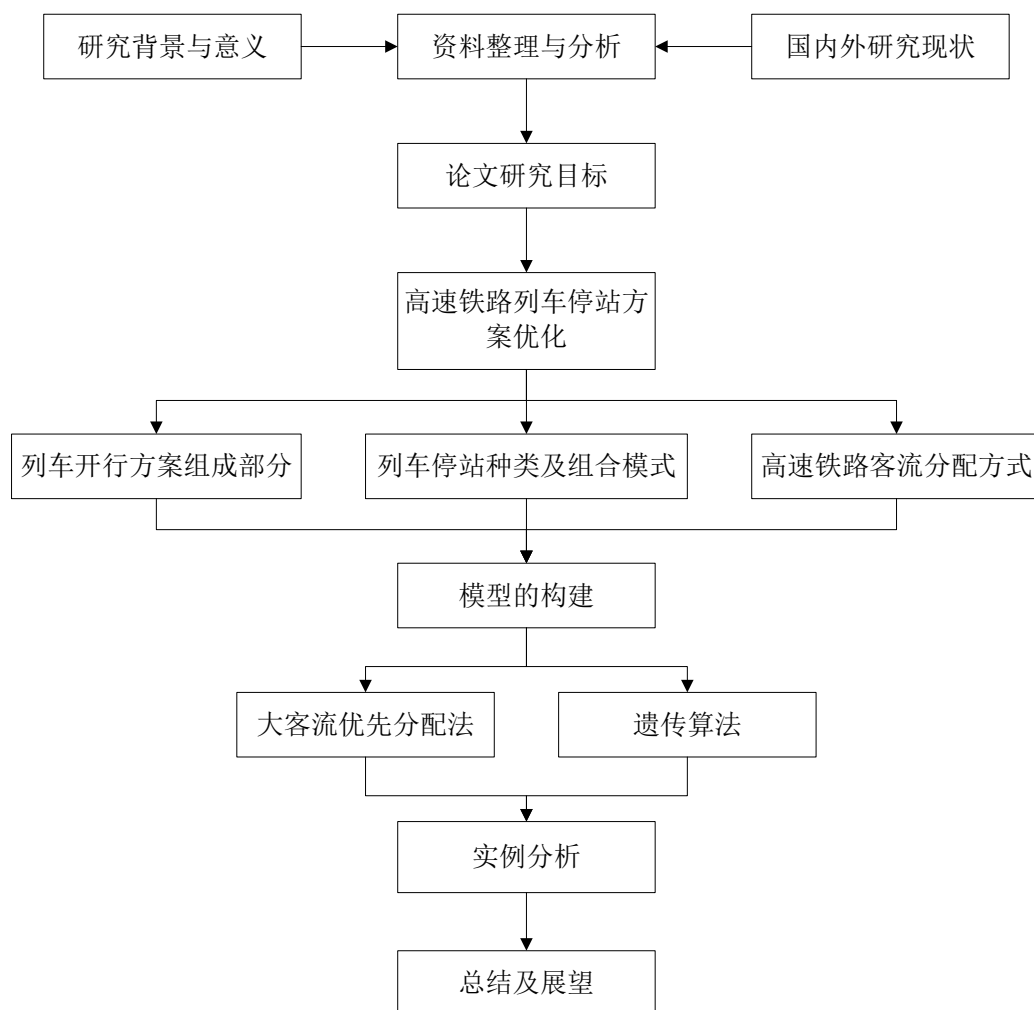


图 1-1 技术路线图

Fig.1-1 Technical Route of Research

1.5 本章小结

由于高速铁路覆盖范围的逐渐增大，客流需求日益变动，组织高速铁路运营工作的复杂程度也日益增大。所以，在满足日益变动的客流需求的基础上，如何将各种运力资源更为合理且科学经济的分配是运营部门必须解决的重大问题。因此本文进行高速铁路列车停站方案的优化，来达到既能缩短旅客时间损失，又能减小运营成本的目的。

在这个研究背景之下，本文总结了既有的国内外研究成果，指出既有研究的不足的地方并设计研究方法。以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标，把满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停靠站台的次数约束、始发终到站及重点车站停站约束作为约束，构建了多目标非线性规划模型，结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点，根据乘客对列车的选择方式，即乘客通常会选择在途时间最短的列车，提出了一种适用于铁路的客流分配方式，并设计以理想点法作为适应度函数的遗传算法求解。本文基于以往学者的研究，对以下三点进行深入的探讨：

(1) 现在学者在对停站方案进行研究时,大多研究对象是开行方案,他们在进行方案优化时,把对停站方案的优化视为开行方案优化的一个小点。通过求解经过处理后的列车停站问题,用最优停站方案去匹配列车备选集或者对开行对数进行循环迭代以求得最优开行方案。这种求解思路没有充分考虑到停站方案的其他影响因素所带来的影响。所以,本文将高速铁路停站方案单独作为研究对象进行了进一步的研究。

(2) 目前大多数学者在进行铁路上的客流分配的过程中一般采用全有全无法、用户均衡模型或随机用户均衡模型,或将客流量当作约束条件考虑。本文结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点,根据乘客对列车的选择方式,即乘客会选择在途时间最短的列车,提出了一种适用于铁路的客流分配方式,并命名为大客流优先分配法。

(3) 现有的研究在模型的多目标问题的处理方法上大多是采用了将设计的各优化目标函数进行加权处理,形成一个单一的目标。一般的权重赋值方法在处理此类问题是会受到主观因素影响,在处理问题的过程中偏向于其中一个目标,从而导致优化结果的不合理,这也使得最终优化后的结果存在很大的主观性,同时就会导致局部收敛。本文设计以理想点法作为适应度函数的遗传算法进行求解。

第二章 相关理论基础

高速铁路列车停站方案是开行方案的重要子集，所以本章先分析高速铁路列车开行方案的内容，接着分析高速铁路列车停站方案的内容。由于客流分配方法是列车停站方案中必不可少的一环，所以本章分析了传统交通量分配的基本方法并论证传统客流分配方式不适用于高速铁路客流分配。

2.1 高速铁路列车开行方案

国际铁路联盟定义，高速铁路是指运行速度不小于 200km/h 的既有线改造线路或者运行速度不小于 250km/h 的新建线路^[61]。

2.1.1 高速铁路特点

高速铁路与既有线铁路的主要区别在于设施条件、管理条例、服务水平等方面。我国高速铁路的特点主要在以下几个方面：

(1) 列车开行速度快，开行密度大，且品质较高。以京沪高铁为例，它的最高运行时速达到了 310km/h，且相邻两次列车的最小间隔时间为 3 分钟。

(2) 高速铁路线路上只有两种不同速度等级的列车开行，分别为 D 和 G。

(3) 高速铁路列车都为动车组列车，不能通过临时增减车厢的方式来调整列车的运输能力。

(4) 高速铁路动车组车底紧张，一列列车完成一次运输计划后需要在最短的时间内开始另一次运输计划，具有交路紧的特征。

(5) 高速铁路与既有线铁路正常情况下不进行跨线运营。

(6) 高速铁路列车一般不在开行，如在夜间开行，则往往使用 V 形维修天窗。

2.1.2 高速铁路列车开行方案组成部分

传统的列车开行方案包括列车起讫点、走行径路、开行等级、数量、编组、停站方案、车底运用等内容。由于高速铁路列车所具有上述特征，有学者提出高速铁路列车开行方案主要由列车开行的时间、次数、停站三部分构成^[62]。本文结合上述分析，把高速铁路列车开行方案分为列车运行区段、列车开行频次、列车停站方案三个部分。

(1) 列车运行区段

列车运行区段确定列车由何处驶向何方以及具体走哪条路径。因为既有线铁路有着路网交错复杂、车站数量众多且规模不同的特点，所以列车可选择的始发终到站、行驶路径选项较多。而对于高速铁路列车来说，起讫点需要满足动车组检修等设备设施条件要求，而在我国只有很少的站点能够符合动车组检修条件，高铁路网较为单一，因此，

高铁列车始发终到站、行驶路径的选择较少。

（2）列车停站方案

列车停站方案是在列车运行区段确定的前提下明确列车在线路上经过的车站是否停站的具体方案^[63]。列车停站方案内容主要涉及列车停靠车站以及到站时刻、停站时间、出发时刻。旅客乘车的便利程度与列车停站方案直接关联。此外，因为高铁列车有着周期性的开行方式，加之沿途车站数量众多，所以想要设置合理的停站方案十分困难，必须要克服的难点在于如何组织协调各列车运输工作、怎样在列车停站与旅客需求之间找到供求平衡点。

（3）列车开行频次

列车开行频次指的是在同一区段内，不同班次的列车在一段时间中开行的总量。既有线的开行方案需要确定列车开行总数。列车开行总数是指运输部门按照沿线客运情况，在运营区段内安排的列车开行对数。高速铁路跟既有线存在差异，因为高速铁路列车有开行密度大以及周期性的特点，所以不能仅仅知道一天开行多少趟列车，还需要知道一段时间中具体开行了多少趟列车。通常，高速铁路列车开行频次与客流量的大小呈正相关。

2.1.3 高速铁路列车开行方案编制流程

高速铁路列车开行方案与客流的关系主要体现它的总体目标是在满足铁路客运市场需求及有关技术得到保障的前提下，使动车组列车和其它各种客运机器设备资源得到更为科学合理地利用，从而进一步提升资源的利用效率和运营部门的经济效益。因此，在新的铁路线路需要投入使用前，管理部门需要对该线路情况进行市场勘测、运量预测等工作，根据调查结果来制定满足市场需求的开行方案，编制流程如图 2-1 所示。

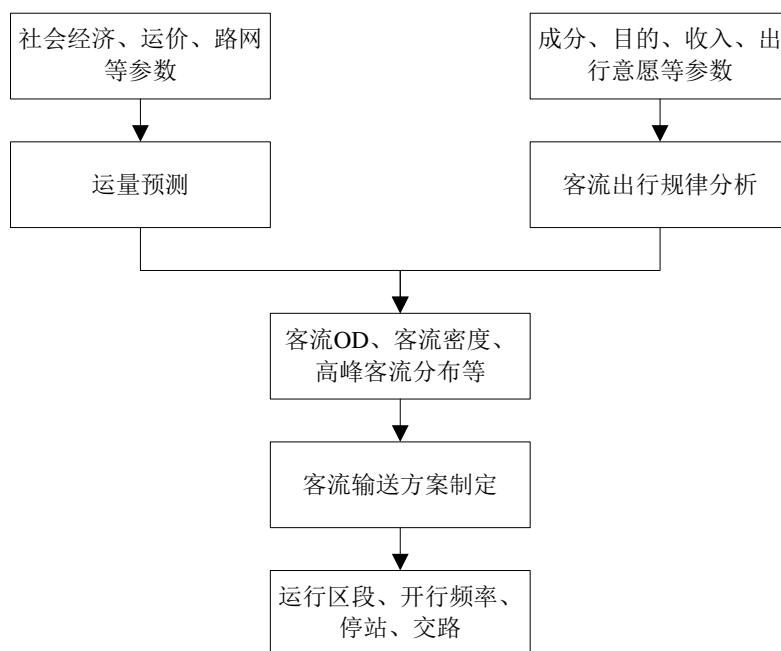


图 2-1 高速铁路列车开行方案的编制流程

Fig.2-1 The preparation process of the high-speed railway train operation plan

具体来说，要制定新线的列车开行方案，第一步，要对以往客流数据进行全方位的剖析，发现客流变化规律，对未来的客流量进行科学预测。第二步，根据市场勘查结果修正未来客流量的预测，将客流铺画到高铁线路上。第三步，结合客流需求，设计符合企业规定和生产需求的列车开行方案。

2.2 高速铁路列车停站方案

良好的列车停站方案需要协同考虑旅客出行时间、列车停站次数和运营部门经济收益等方面。它能极大程度的满足不同的客流需求，改善客运服务质量，还对提高铁路运输部门的运营效益，推动铁路运输企业市场化改革产生有利影响。

2.2.1 停站方案的含义

列车停站方案指的是在确定的列车运行区段、列车等级、列车对数下，按照客流需求确定各列车的停站序列。高速铁路列车停站方案由停站次数、停站时间和停站地点三个部分组成。

(1) 停站次数

高速铁路列车的运行总时间和停站频次有着十分紧密的关联，增加停站的次数，列车运行的时长就会相应的增长，所耗用的时间成本就会增大。但是如果过度减少列车停站的次数，就会导致车站的服务频率过低，这样就会增加乘客在中间站上下车的难度，旅客服务质量也随之降低。考虑到这种原因，停站次数既不能过度缩减也不能过度增加，需要在乘客的出行需求得到满足的情况下控制在一定的范围内。

（2）停站时间

影响列车停站时长的因素主要有在该车站需要进行的作业类型，上下车的旅客的数量、列车自身的速度等级和车站的站点级别^[64]。通常，列车需要在有很多旅客需要上下车的车站或者等级较高的车站停靠更长的时间，相反的在旅客上下车数量较少的车站或是等级较低的车站停靠的时间相对较少。参照铁路部门对于停站时间的有关规定，各种速度级别的列车在高级或者低级车站的停站时长如表 2-1 所示。

表 2-1 不同速度等级的列车在不同等级的停站时间

	速度等级 300km/h 及以上	速度等级 250km/h 及以下
高等级车站	2-5 分钟	4-6 分钟
低等级车站	1-3 分钟	2-4 分钟

（3）停站地点

影响高速铁路列车停站地点设置的方面有很多。首先，有些站点时列车必须停靠的站点，因为它受到现有的高速铁路列车技术的限制或者国家政策要求该站点必须停靠。其次，列车是否停站也与该站点的客流量息息相关，列车停站点的设置要极大程度上适应客流量的需求并且要考虑到铁路管理部门的资源是否得到了合理分配。所以我们要在满足客流需求的情况下去提高直达车的数量，这样就能使铁路管理部门的服务水平得到提升，旅客的出行也更加便捷；最后，停站地点设置要尽量使区间内站点得到连接。

本文从列车停站地点的设置和在该区间内的停站次数两个方面优化高速铁路的停站方案。因为列车在区段内每个站点的停靠时间的长短是在运行图绘制时就已经被确定了，所以本文暂时没有考虑这个方面。

2.2.2 停站方案的模式

合理的停站模式有利于设置停站方案来尽可能达到各个节点上旅客的出行的需求。停站模式主要分为以下几种^[65]。

（1）一站直达模式

一站直达模式指的是旅客在列车的起始点和终到点上下车的需求量比较多的情况下，列车选择只在起点站和终点站停靠，中间的站点将不再停靠，示意图见图 2-2。这种停站模式能最大程度上体现高速铁路方便快捷的特点，因为对于只想要在该列车终点站下车的旅客来说，它会降低他们的出行在途时长。然而这种停站模式也存在一定的弊端，比如在这段区间内选择此班列车的乘客的数量会减少，降低了它的服务能力。如果大量使用这种模式的停站方案，也会影响到其他模式下的停站方案。如果在起始站上车终点站下车的旅客数量不多，而采用这一模式的列车较多那么就会造成列车载客能力的大量浪费，不利于铁路管理部门的经济效益。所以，制定停站方案时，应该将这种模式的列车比例控制在合理的范围内。大多数情况下满足一站直达模式条件的条件为始发终

到站为客流量较大的城市，有充足的车底往返两地之间，通常两地距离不会太远。

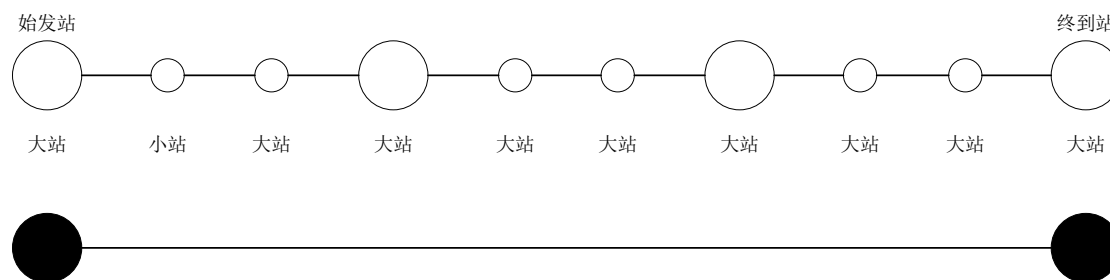


图 2-2 一站直达模式示意图

Fig.2-2 One stop to arrive pattern

(2) 大站停模式

大站停模式指的是在列车运行区段内只在大站停靠的停站模式，列车开行在客流需求大的车站间。这种停站模式可以使旅行速度和车站服务频次都保持在良好的范围内。这种停站模式并不根据铁路车站规模确定大小站，它划分车站大小的依据是车站最近几年的铁路客运量、车站基础设施建设情况、所在城市的等级等。

这种停站模式是仅在大站进行停站作业，示意图见图 2-3。大站停模式能够增加大站间的可达性，丰富大站间旅客的出行时间需求，与此同时，由于大站停模式并不在小站停车，从而降低总停站次数，减少了大站旅客的在途时间。然而这种停站模式的弊端也很明显，由于大站数量较少，导致列车停站固定，降低了灵活性。

大站停模式大多情况下运用在相邻的多个大中城市间，其客流需求特点鲜明，通常为上下班通勤或出差，对时间损失需求敏感，各站间旅客客流量在高峰时期很大。

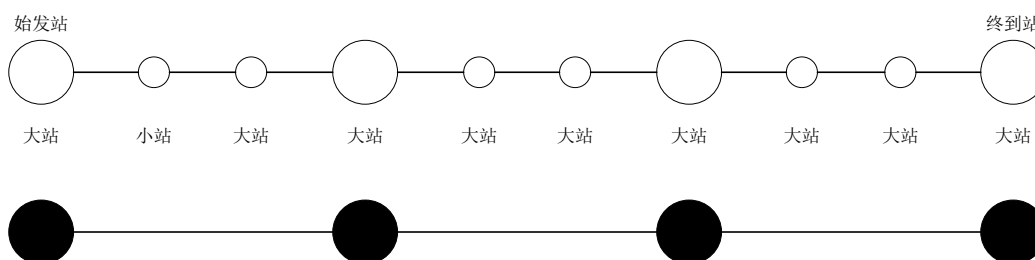


图 2-3 大站停模式示意图

Fig.2-3 The large station service pattern

(3) 站站停模式

站站停模式指的是在列车运行区段内的所有途径车站都办理停站作业，示意图见图 2-4。这种停站模式下列车在途经的每个车站都需要停靠，从而满足所有客流需求，旅客在此区段内的出行均可乘坐直达列车。

站站停模式的弊端是显而易见的，特别是当列车的运行里程较长时，如果每站都停就会让有些出行较远的旅客在出行上所耗费的时间变长，对列车开说，这种停站模式也

会在整体上减缓列车运行速度，造成运能浪费，也会对运营部门的经济效益产生不利影响。

根据这种特点，往往只会在列车运行里程较短时才会使用站站停模式，而列车运行里程较长时就不会考虑这种模式。使用这种模式可以在一定程度上可以解决客流需求不足和服务频率不高的问题，补充其他停站模式的不足之处。

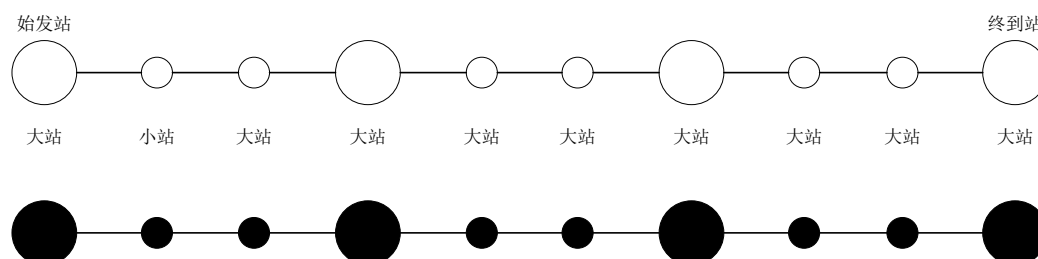


图 2-4 站站停模式示意图

Fig.2-4 Stopping station by station pattern

(4) 择站停模式

择站停模式指的是列车不仅要在整个行驶过程中途径的大站停靠，而且还要在有些有需要的小站停靠的停站模式。这种模式结合了大站停和站站停的特点，示意图见图 2-5。这种停站模式的原则是有选择性的进行小站停靠来尽可能的满足线路上的客流量需求。

择站停模式的好处在于不仅能够给需要在大站间往返的旅客提供服务，也能够为需要往返于大站和小站之间的旅客提供服务。相较于站站停模式，择站停模式不会再所有的小站都选择停靠，所以它的停站次数得到降低，整个列车的运行时长以及乘客的在途时长也会相应的缩短。这种停站模式的不足之处在于有些旅客不能通过一列列车直达目的地，且其选择停靠的站点不是固定的。

择站停模式往往会在行驶里程较长，线路上不仅会途经较多的大站还会途径较多的小站，这种停站模式是为了极大程度的满足沿线客流需求。

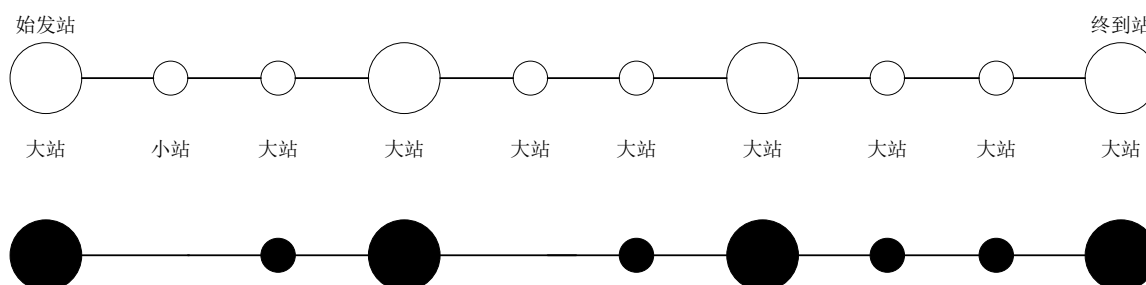


图 2-5 择站停模式示意图

Fig.2-5 The large station and some small station service pattern

2.2.3 停站方案组合模式

一般情况下会使用多种停站模式去辅助构成停站方案，如果单一使用任何一种停站模式都会或多或少的影响到客流的需求且不利于交通管理部门的经济效益的实现。总而言之，选择哪一种停站模式或者使用哪些停站模式进行组合形成停站方案，都需要对该条线路上的实际情况进行调研，使其适应该条线路上的客流需求。

(1) 大站停交错组合

大站停交错的组合模式一般是在线路里程较长，且沿线途经的大级别的站点较多大站间的客流量也比较大的情况下使用，示意图见图 2-6。一列高速铁路在沿线途经站点能够停靠多少次是被设置了上限的，所以对上述情况来说，不可能在每个大站都选择停靠，那么就可以有选择性的在需要停靠的大站进行停靠，这样在满足了沿线旅客的出行需求的同时又能使停靠的站点数不会超过限制。

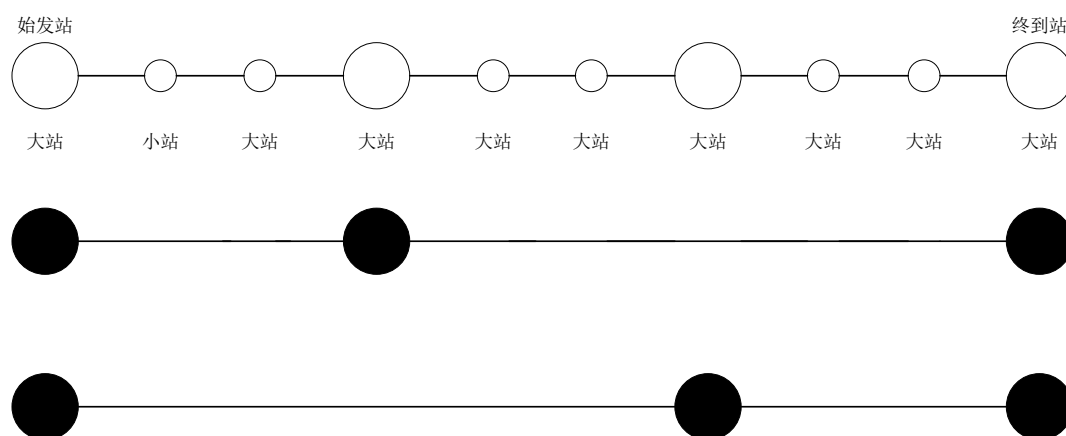


图 2-6 大站停交错模式示意图

Fig.2-6 The large station staggered stopping pattern

(2) 择站停交错组合

这类组合的停站，模式是在大站停交错模式的基础之上，根据旅客的出行需求，在沿途合适的小站也会选择停靠，示意图见图 2-7。择站停交错的组合模式可以分为两类，“大站必停，小站交错”和“大站交错，小站交错”。前者是说在列车对沿线途经的站点选择停靠时，在每一个大站都会停靠，而对于途经的小站就会有选择性的停靠，那么在这种停站组合模式下的停站次数教第二种模式就会较多，不能够保障列车的行驶速度；后者是有选择性的进行停车，仅仅选择在合适的大站或者小站进行停靠，那么就没必要在每个大站停靠，缩短了列车的整体运行时间。选择在哪些站点停靠，这在很大程度上需要参考沿线各站的客流量情况和车站的服务水平。

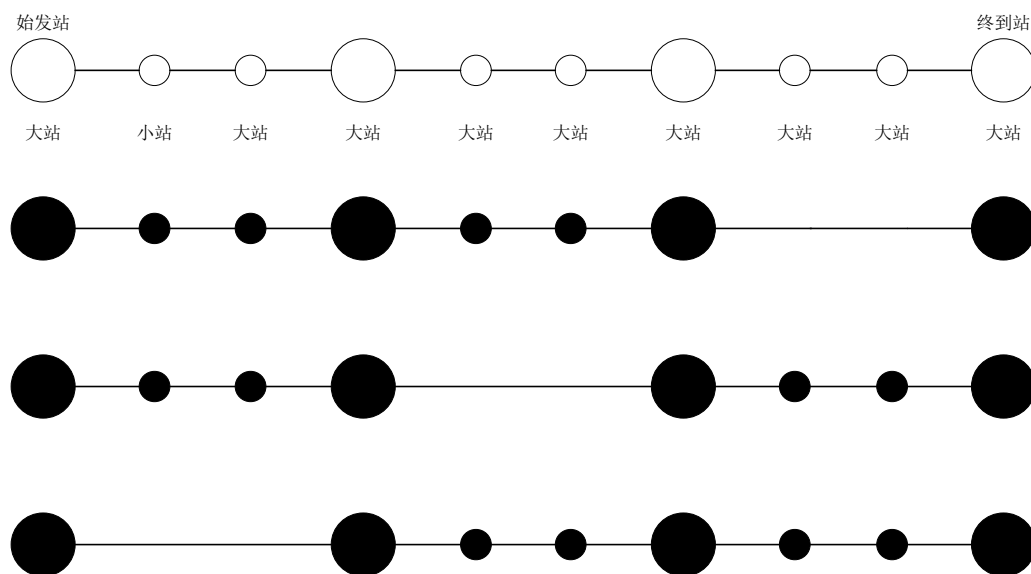


图 2-7 择站停交错模式示意图

Fig. 2-7 The large station and small station staggered stopping pattern

(3) 多种停站方式组合

随着我国高速铁路事业的发展，高速铁路网的建设规模在不断扩大，线路的复杂程度也在不断提高，人们的出行需求也日益多样化。这就导致了不同的车站的服务水平和旅客的需求也不尽相同。所以对与铁路管理部门来说，就不能单一的使用某一种停站方案，需要结合各种停站方案的特点制定适合该条线路的停站方案以适应不同情况下的旅客出行需求。

2.3 客流分配

客流分配是研究列车停站方案优化问题的必不可少的一环，将客流分配到每一列列车上，可以为停站方案制定、开行方案制定、客票分配等环节奠定基础。

2.3.1 客流分配的基本方法

我们在分配交通流量时，需要提前知道已经发生的 OD 交通量、路网结构图和其中各路段的基本要素。要合理的分配客流量需要事先知道网络中总的旅客出行需求量、换乘的线路结构情况以及什么原因导致了不同的旅客选择某一列列车。当前，客流分配有很多研究办法，其中包括 0-1 分配法、二次加权平均法、增量分配法、平衡分配法等。这些分配方法它们各自的适合使用的情况，使用它们进行计算的难易程度和精确程度也不尽相同。依据已有的方法，同时考虑旅客的构成分类及其出行选择行为特征，可以进一步对其分配规律进行探究。接下来将会对主要的几个分配方法特点和基本思路进行介绍，并以此为基础建立相应的配流模型^[66]。

(1) 0-1 分配法(all-or-nothing assignment method)是最简单同时也是最基础的分配

方法, 该分配方法的主要目的是寻找最短路径。以下是 0-1 分配法的特点: 首先, 该方法认为列车行驶的时间不会收到该条线路上旅客量大小影响, 即不考虑拥挤程度对行驶时间造成的影响。其次, 该方法假定如果旅客的 OD 相同, 那么他们大概率也会用一样的线路出行。但是, 正是由于 0-1 分配方法不随客流量大小变化的特点, 该方法并不能反映交通流量产生的影响, 所以该方法主要适用于某些道路较少的偏僻区域, 用于非拥挤交通网络中的交通量分配。相反, 在道路较多的区域, 并不适合采用该方法, 但它通常可为其他种类的方法打下基础。

(2) 增量分配法(incremental assignment method)是通过将 OD 交通量划分成 N 个等份, 然后将每个等份的交通量循环分配到 OD 之间的路径上, 每次将一份的交通量分配到与其匹配的最短路径上。分配完之后, 重新计算路段阻抗, 然后再次确定下一份交通量的最短路径。这种分配方法采用类似积分的思想, 处于全有全无和逐个分配之间。交通量视为一个整体时, 结果与 0-1 分布法相同。解决方案与平衡分配法一致。该方法操作方便, 可行度高, 使用计算机编程可以轻松实现, 而且其精度可由 N 的大小调节。

(3) 二次加权平均法(method of successive averages)通过不断更新分配给每条线路的交通量, 并使其慢慢接近均衡状态。在每次循环时, 通过对每条路径进行单独的 0-1 分配得到每个路径所增加的交通量。然后通过对原有交通量和增量进行加权分配, 并将得到下一个循环的交通分配量。如果相邻循环周期的交通分配量差值足够小, 则可以使计算终止, 并将停止循环前的交通分配量作为最终结果。二次加权平均法实用性强, 且与平衡分配法最为接近。它唯一的不足之处是每次加权平均循环计算时, 均需要计算者来确定权重系数。

(4) 平衡分配法(Wardrop equilibrium assignment method)由 Wardrop 提出, 那就是: 在道路网的使用者都确切知道网络的状态, 并且试着选择能满足自己出行目的的最短路径时, 各条路径阻抗相同。对于同一个用户来说, 他能选择的每条最短路径所耗费的出行时间都相等且最小。

2.3.2 高速铁路客流分配方式分析

高速铁路客流分配方法其实是对旅客选择列车以达到出行需求的目的进行仿真, 要求精准的反应旅客的实际出行行为。旅客的出行行为分两步, 首先寻找列车的停站包括旅客出行起讫点的所有列车。旅客一般会选择直达列车而不是换乘列车。然后是对各满足需求的列车的附加条件, 比如票价、出行时间、出行舒适性等。最后购买车票, 确定出行方案。高速铁路旅客出行行为与传统的客流分配方法的差异体现在以下两点:

(1) 与现有寻路算法的差异

高速铁路旅客是寻找列车的停站包括旅客出行起讫点的所有列车。然后是对各满足需求的列车的附加条件, 比如票价、出行时间、出行舒适性等。最后购买车票。现有的寻路算法在线路上设置了数量庞大的假设节点, 原理是利用积分思想将路径尽可能缩短, 得到最短路径时只有最短路径上的节点是派上用场的。也就是说, 其余的节点是不需

要进行搜索的。在高速铁路客流分配时只要结合列车运行图以及票价信息即可确定用户出行费用最小的客流分配方案。

(2) 与现有配流算法的差异

大多数学者在进行高速铁路客流分配是一般采用用户均衡分配模型，然而用户均衡定理需要满足以下假设才能成立：

- 1) 用户都能充分掌握起点和终点间各条道路的阻抗大小。
- 2) 用户可以自由选择路径。
- 3) 用户会选择耗费时间最短的路径。
- 4) 在道路完全饱和之前，路段上的阻抗和该路段上用户的数量呈正相关。

公路系统是可以同时满足上述四个条件的，但是铁路系统与公路存在着很大的不同，如果用户能够掌握阻抗的大小并且在理性的驱使下选择所耗用时间最短的路径，但是他不能做到完全自由的进行路径选择，路段上的阻抗和用户数量也不一定完全呈现出正比例关系。在铁路系统中，即使乘客了解到该条线路上存在一定的拥堵情况，但是他依然可以出于阻抗较小的原因选择该条线路。并且对于铁路来说，其用户只能通过线上或线下购票的方式来实现对路径的选择，那么这在很大程度上就会受到售票方式的不可控制约。在这种情况下，铁路列车在人员已满的情况下是不会再进行车票的售卖的，那么出行者的自由选择就会受到制约。假设 4 中所提到的阻抗是指选择了该条路径所需要消耗的成本，这里的成本是一个广义的概念，它不仅包含购买车票的价格还包括选择该线路所可能要花费的时间成本，交通工具内部是否拥挤，乘坐的舒适程度的高低和会产生影响。在铁路系统上路径是由大于等于一条列车组成的，列车在什么时间点上开行这取决于列车的运行图。票价的制定是要参照行驶路线的长短和单位距离的价格决定的，在一定程度上时间和价格可以看成是不会发生变动的。并且上文提到高速铁路列车的售票在满员时一般是不会在超载售票的，所以在列车内部就不会像公路系统一样出现拥挤的现象。所以每条线路的广义成本就不会随着选择人数的增减而产生变化。

由上述描述可得用户均衡定理并不适用于高速铁路客流分配。接下来会对这一结论进行证明。

2.3.3 用户均衡定理不适用于高速铁路客流分配的证明

高速铁路线路图如图 2-8 所示：A 为线路起点站，B 为线路终点站。 l_1 、 l_2 为 A、B 之间的两条线路，两条线路的阻抗分别为 t_1 、 t_2 ， c_1 、 c_2 分别为 l_1 、 l_2 中开行列车的定员数量。 q 为从 A 地到 B 地的客流数量， q_1 、 q_2 为 l_1 上列车运输的客流量， q_1 、 q_2 为 l_2 上列车运输的客流量， q_1 、 q_2 未知， q 已知且 $q_1+q_2=q$ 。

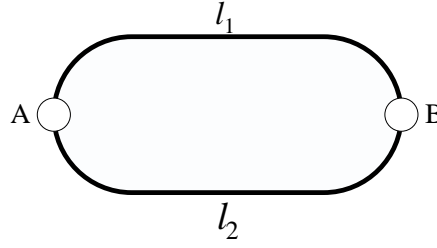


图 2-8 铁路系统路径示意图

Fig.2-8 Schematic diagram of the railway system path

所有用户均选择出行时间最小的路径，此时系统达到了一个平衡。可以通过广义费用函数求解选择 l_1 和 l_2 的客流量 q_1 、 q_2 ：

$$\min \sum_{i=1}^2 \int_0^{q_i} t_i(\varpi) d\varpi \quad (2-1)$$

$$s.t. \quad q = q_1 + q_2 \quad (2-2)$$

$$0 \leq q_i \leq A_i \quad \forall i \in \{1, 2\} \quad (2-3)$$

高速铁路路段的阻抗不是随着客流增加而慢慢变化的，而是当乘客数到达额定载客量时，后续的乘客就不能选择乘坐这趟列车。所以阻抗函数 t_1 和 t_2 为常量，可以用常数 a_1 和 a_2 表示。式（2-1）经过计算可以写成：

$$\min \sum_{i=1}^2 t_i q_i = \min(a_1 q_1 + a_2 q_2) \quad (2-4)$$

将式（2-4）中的 q_2 用 $q - q_1$ 代替，得到新的目标函数

$$\min[(a_1 - a_2)q_1 + a_2 q] \quad (2-5)$$

对其进行分析， a_1 、 a_2 、 q 均已知且为正数，首先 $a_2 q$ 为一个正数，求目标函数的最小值就要考虑第一项的正负关系，即 a_1 和 a_2 的大小关系，共有三种大小关系。当 a_1 和 a_2 不相等时，虽然可以求解出 q_1 和 q_2 的值，但是两条路段的阻抗 t_1 和 t_2 不相等，并没有达到用户均衡状态。当 $a_1 = a_2$ 时，目标函数为常数，此时两条路段阻抗相等，但是任意用户可以更改路径，也不能达到用户均衡状态

综上所述，用户均衡定理并不适用于高铁客流分配。

2.4 本章小结

本章首先分析高速铁路开行方案的组成部分以及开行方案的编制原则，说明客流分配在停站方案以及开行方案优化的过程中是必不可少的环节；其次分析高速铁路列车停站方式及组合模式；最后分析基础的客流分配方法，证明用户均衡定理并不适用于高速铁路客流分配，为后文提出适用于高速铁路的客流分配方法做铺垫，为后文的研究打下基础。

第三章 高速铁路列车停站方案建模分析

通过上文对基础理论方面的分析与分析，本章对高速铁路列车停站方案建模过程进行了分析，分析列车停站方案的影响因素，建立了多目标优化模型，并分析了模型的性质，为后文设计算法进行铺垫。

3.1 列车停站方案影响因素

要使高速铁路列车停站方案编制得更为合理，需要将旅客出行的需求充分考虑，并且也不能过度使铁路管理运营的成本增加。要将铁路相关资源合理配置，使其不会造成不必要的浪费^[67]。本章重点分析了客流需求、基础设施能力和服务水平对高速铁路列车停站方案的影响。

3.1.1 客流需求

高速铁路的列车停站方案在很大程度上会被旅客需求所影响，编制出来的列车停站方案需要与旅客的数量以及等级相匹配。

在客流量水平不同的情况下，高速铁路列车停站方案为了与之相适应，在每个车站的停靠时长和停靠的频次也会不一样。当车站的旅客出行量比较大时，往往在该车站停靠的列车数量就会较多，这样才能满足客流量的需求；并且如果该车站的旅客出行量大说明需要在该车站上车或者下车的旅客数量就较多，所以为了保证他们拥有足够的时间完成上下车，就要求在该车站停靠的时间相对较长。旅客的等级会在乘客面临服务质量的价格选择问题上影响旅客对列车的选择，如果旅客自身的支付能力较高，那么它对于价格的敏感度就较低，在高价格高服务和低价格低服务面前会更倾向于选择高服务，相应的为此类旅客就需要准备高等级的列车。而对于一些对价格比较敏感的旅客来说，他们往往更加追求极致的性价比，他们更倾向于选择价格更低一点的列车，尽管这会使他们丧失一点服务质量。所以在进行高速铁路停站方案的设计上，也要充分考虑到旅客的等级，保证追求高服务水平的旅客和追求更低价的旅客都能够选择到自己满意的车次，这样就能在最常程度上将旅客的需求转化成列车所需要提供的总服务。对于高速铁路的客流量来说也存在着季节性或者节日性的高峰期，在节假日中客流的需求量可能会突然增加，所以在制定高速铁路列车停站方案时，也要将这类高峰考虑进去。

3.1.2 基础设施能力

高速铁路列车停站方案的制定还需要结合车站服务能力和区间通过能力。

(1) 车站能力

高速铁路车站的发车能力会受到该车站的总的站台数以及该车站的折返能力的影

响。接发能力也会被车站总的站台数量所制约。我国高速铁路车站内正常情况下只有两条正线,是没有到发线的,所以如果有后来的列车想要进站就必须等到上一列列车离开,这中间就会产生一些等待的时间成本。

(2) 区间通过能力

一个区间能够提供的服务总量受到区间长度以及各种固定设备资产和对该段的管理策略的制约。在一个较短的时间内这些因素是不会发生太大的改变的,因此该段能够在单位时间内通过的列车数量就不会发生改变。这个列车数量又可以称之为该区间的通过能力。列车的在途经的车站停靠,而靠站就会增长列车的整体行驶时间,同样的就会占用在该区间内的行驶能力,因为同一个区间在短时间内由于它的基础设施能力固定,能够提供的服务总量也相对固定,增加列车的停站次数会使得在总时间固定的情况下该区间内能够通过的列车数量减少。

3.1.3 服务水平

高速铁路车站服务水平受到节点服务频率、OD 服务频率和旅客旅行时间等因素影响。

(1) 节点服务频率

节点换而言之就是高速铁路的车站,不同车站的等级不一定相同。不同的车站由于所处的城市不一样,城市的经济水平也不一样,导致了该车站用户的出行需求量和对车站及列车服务的水平也不同。所以要设置不同等级的高速铁路列车服务节点。

高速铁路列车节点处在一个高等级的状态,说明在该节点上的旅客出行量较大,对服务水平的要求较高,通过该节点的列车数量也相对较多,该节点的停站设计也非常重要。在对该节点进行停站方案设计时要注意安排更多的列车在此站点停靠,但是也要控制在该站点能够服务的能力范围内。对于被划分为低等级的节点进行停站方案的安排时,要注意合理的少停靠此站点,在满足站点客流需求的前提下避免不必要的资源浪费和成本增加,从而对铁路运输部门的整体效益造成不利的影响。

(2) OD 服务频率

OD 服务频率指的是在目标起讫点之间通行多少列列车。在这段区间内如果其起始点和终点是两个等级比较高的节点,那么就要求在这两个节点之间的 OD 服务频率相对较高,即在该段运行的列车数量就较多。我们把节点的等级分为高级和低级,最高等级的两个节点间的列车运行对数相较于其他级别的两个节点之间的列车运行对数要更多,这样才能与该段的旅客出行需求相匹配,不会产生供不应求的现象,也不会产生资源的过度浪费。

(3) 旅行时间

旅客选择乘坐高速铁路出行一个很重要的方面就是高速铁路的速度较快,对于旅客来说其所需花费的时间成本就较低,产生的出行幸福感就较高。旅客出行所需要花费的时间由两个方面组成,其一是旅客的候车时间,由于列车在什么时刻发车是可以获得的,

那么旅客的候车时间在很大程度上取决于旅客在什么时刻到达车站。其二是旅客的在途时间，它是可以通过铁路部门调整管理方案改变的。由于旅客的候车时间的决定性因素是由旅客自身的主观能动行控制的，在进行停站方案的优化时就不需要考虑到这一影响因素，因此本文在下文对高速铁路列车停站方案进行优化时没有加入这一因素。

3.2 问题描述

高速铁路列车停站方案是高速铁路列车在列车径路、类别、编组辆数、开行频率确定后，在各站点是否停站的停站序列。本文以直线型多始发终到站的列车停站方案为研究对象。

设 $S = \{S_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 为某一段高速铁路沿线所经过的车站组成的集合， S_1, S_2, \dots, S_n 分别表示某一个方向上上行的列车或下行的列车从该区段的起点行驶到终点途经的站点， n 表示该线路上一共途经的站点数。 $T = \{T_k | k=1, 2, \dots, m\}$ 为这条高速铁路线路中的开行的列车构成的集合， m 表示这条线路上一共有多少量列车开行。

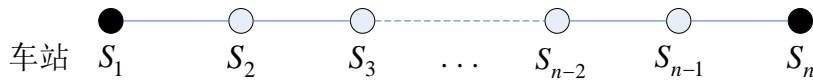


图 3-1 高速铁路线路示意图

Fig.3-1 Schematic diagram of high-speed railway line

对于不同的列车 T_k ，它们的编组辆数不尽相同，用 G_k 表示高速铁路列车编组辆数。高速铁路列车编组辆数大多为 8 节或 16 节。不同的编组辆数也对应着不同的列车运输能力，往往用额定载客量来描述列车运输能力，用 c_k 表示列车 T_k 的额定载客量。

引入 0-1 变量 $x_{k,i}$ 来描述列车 T_k 在车站 S_i 的停站情况，若列车 T_k 选择在车站 S_i 停站，则设定 $x_{k,i} = 1$ ，若列车 T_k 选择在车站 S_i 不停站，则设定 $x_{k,i} = 0$ 。

引入变量 $q_{k,i,j}$ 为列车 T_k 上从车站 S_i 到车站 S_j 的旅客数量， $q_{i,j}$ 为从车站 S_i 到车站 S_j 的客流量。 $q_{i,j}$ 已知且 $q_{i,j} = \sum_{k=1}^m q_{k,i,j}$ 。

通常，一条线路上的列车停站方案包含多个起始站和终点站，对于不同开行区段的列车，他们的起始站和终点站不同，用 s_k 表示列车 T_k 的始发站，用 e_k 表示列车 T_k 的终到站。即当 $S_i = s_k, e_k$ 时， $x_{k,i} = 1$ 。用 R_k 表示列车 T_k 的开行区段，而不在开行区段中的车站，对于列车 T_k 来说，不存在停站作业，即当 $S_i \notin R_k$ 时， $x_{k,i} = 0$ 。

3.3 模型假设

综合其他学者的研究成果，直线型高速铁路停站方案的影响因素较多，在建立模型

之前,必须进行相关假设:

(1) 相同性假设。假设在同一条线路的两个方向上具有完全相同的客流量,那么这两个方向上所获得的经济效益也是相同的,所以整条线路的收益就可以看成单个方向上所获得收益的两倍。要使得整条线路的收益达到最大,只需要让单条线路的收益最大即可。

(2) 封闭性假设。假设本文研究的线路处在一个不受外部因素影响的系统中。在高速铁路中存在本线列车和跨线列车两种形式,本文对停站方案的优化仅考虑本线列车的停站方案和本线客流,不考虑跨线列车和跨线客流。

(3) 相似性假设。假设在同一线路上运行的列车采用同一种车底,同一种车底的列车的最大载客数量、运行时速和在车站办理停站作业的时间都是相同的。

(4) 确定性假设。本文结合客流数据和开行方案的相关内容对既有的停站方案进行优化。也就是说,客流量、列车开行对数、运行区段、行走径路等均已知且作为前提条件。

(5) 不换乘假设。在本条线路上,所有的旅客都会选择乘坐能够直接到达目的地的列车而不会选择需要换乘其他列车的方式到达最终目的地。

(6) 能力限制假设。由于区间通过能力和车站服务能力在该区段内是固定的,可能会使优化后的停站方案受限于能力约束,所以假设对停站方案进行优化不会受到区间通过能力和车站服务能力的限制。

3.4 目标函数构成

列车停站方案主要会影响高速铁路运营管理部门和旅客两方面的利益。因为他们的利益相互关联又不可能同时达到利益最大化,所以这两个主体之前存在着一种相互博弈的关系。对列车停站方案进行优化的目的也是为了使二者达到一个相对平衡的状态。当旅客的要增加自己的利益,也就是使自己的出行时长达到最低时,就需要铁路运营部门安排尽可能多的车次以减少乘客的等待和在途时间,这从另一个角度来说就会使铁路部门的成本增加,影响总体的经济效益。反之亦然,所以对列车停站方案的模型进行优化时要尽可能在使旅客满意度得到保障的同时控制铁路部门的成本耗费,使二者的博弈找到一个较为平衡的点。所以本文以列车停站次数最少、列车空费能力最少且旅客时间损失最小为目标函数构建高速铁路列车停站方案的优化模型。

3.4.1 停站总次数最少

列车停靠的站点越多,那么该列车整体的运行时间就会增长。停站次数越多,不仅会增加铁路部门的运输成本也会增加长途旅客的时间成本。相反的在满足既定客流需求的情况下取降低列车停站的总次数就可以降低铁路部门和旅客的成本,有助于提高二者的满意度。因此,以列车停站总次数最小为优化目标建立目标函数,计算公式为:

$$\min Z_1 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{k,i} \quad (3-1)$$

式中：变量 $x_{k,i}$ 描述列车 T_k 在车站 S_i 选择是否停站的情况，若列车 T_k 选择在车站 S_i 停站，则设定 $x_{k,i} = 1$ ，若列车 T_k 选择在车站 S_i 不停站，则设定 $x_{k,i} = 0$ 。

3.4.2 列车空费能力最少

列车的乘坐率对于铁路部门来说也十分重要，列车的乘坐率较高说明运输资源得到了合理利用，在一定程度上防止了铁路部门资源的浪费，增加其经济效益。一般可以用列车空费能力这一指标来刻画列车上浪费的乘坐能力，它可以表示为区间内空余的座位数和区间行驶距离相乘。计算公式为：

$$\min Z_2 = \sum_{k=1}^m (c_k D_k - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n q_{k,i,j} d_{i,j}) \quad (3-2)$$

式中： c_k 为列车定员， D_k 为列车 T_k 运行距离， $d_{i,j}$ 为车站 S_i 和车站 S_j 之间的距离。

3.4.3 旅客时间损失最小

旅客选择高速铁路出行的时间成本主要由旅客在车站等待发车的时间、列车在途行驶的时间和列车停站所耗费的时间构成。由于旅客在车站等待发车的时间长短在极大程度上取决于旅客自身的到站的时刻，并且当样本够大时会逐渐成为一个可以确定的数值。列车的行驶时间的长短取决于该区段的总里程以及单位时间内的行驶速度，相同等级的列车行驶的速度基本一致，所以列车行驶的时间也可以看作是一个固定的值。

所以本文在建立模型时对旅客时间损失最小这一目标建立的目标函数仅仅考虑可以控制的因停站所耗用时间，另外两个影响因素暂且不做处理。本模型的目标函数所要达到的旅客时间损失最小是让尚未到站而因为列车停站而被迫增加其整体旅程时间的旅客所增加的时间成本，它由列车在车站停靠时间和列车启动和刹车减速所消耗的时间所构成。计算公式为：

$$\min Z_3 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n \{q_{k,i,j} [\sum_{i<p<j}^n x_{k,p} (t_1 + t_2)]\} \quad (3-3)$$

式中： $q_{k,i,j}$ 为列车 T_k 上从车站 S_i 到车站 S_j 的旅客数量，车站 S_p 为车站 S_i 和车站 S_j 中间的车站， t_1 为列车在车站停靠的时间， t_2 为列车因为启动和停靠降低速度而延长的时间。

3.5 约束条件分析

列车停站方案的设计必须要符合铁路运输相关技术规范，同时也要满足客流需求。所以在设计过程中需要满足以下约束条件，比如客流量约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束以及取值范围约束等。

(1) 客流量约束

铁路旅客运输的基本原则是“按流开车”，列车停站方案的设计当然也要遵从这一原则。列车是否进行停站作业需要根据该站点客流量需求来确定。因此，要使在该区间内所有旅客的出行需求都能够被解决，就应该做到供求平衡，也就是列车载客数量的总和应该等于各区段内的旅客数量。约束条件如式（3-4）所示：

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m q_{k,i,j} \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad j=2,3,\dots,n \quad i < j \quad (3-4)$$

式中： $q_{i,j}$ 为从车站 s_i 到车站 s_j 的客流量， $q_{k,i,j}$ 为列车 T_k 上从车站 s_i 到车站 s_j 的旅客数量。

(2) 列车运输能力约束

根据铁路技术管理规程规定，为保证高速铁路列车的舒适程度和服务安全，高速铁路列车上的旅客数量均不能超过列车的规定的最大承载人数。根据后文设计的算法，为方便对约束条件进行检验，检验各个区间内的列车总装载的旅客数量，即每个区间列车上的人数均不能超过列车规定的最大承载人数。

设 n 个车站将高速铁路线路分为 $n-1$ 个区间 r ，约束条件如式（3-5）所示：

$$c_k \geq \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n q_{k,i,j} \xi_{r,i,j} \quad k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,n-1 \quad (3-5)$$

式中： $\xi_{r,i,j}$ 为 0-1 变量，表示区间 r 是否在车站 s_i 和车站 s_j 之间。

(3) 每辆列车停站次数约束

列车停站次数增多就会让有些出行较远的旅客在出行上所耗费的时间变长，对列车来说，也会在整体上减缓列车运行速度，造成运能浪费，也会对运营部门的经济效益产生不利影响。为满足旅客对高速铁路运行速度快、服务质量高等要求以及运营部门成本控制、运营收益等要求，一列列车的最大服务次数必须设置上限。同时为满足必须的停站作业需求，对一列列车的最小服务次数也就是停站次数也要设置一个下限。约束条件如式（3-6）所示：

$$W_1 \leq \sum_{i=1}^n x_{k,i} \leq W_2 \quad k=1,2,\dots,m \quad (3-6)$$

式中： w_1 为列车 T_k 的最小规定停站次数。 w_2 为列车 T_k 的最大规定停站次数。

(4) 始发终到站及重点车站停站约束

通常，一条线路上的列车停站方案包含多个始发终到站，开行区段不同的列车的始发站和终到站也不相同。每一列列车在它的始发站和终到站都一定要办理停站作业，与此同时为满足必要的停站作业需求，某些列车在其相应的重点车站也必须停车。对于列车来说，不在其开行区段中的车站，不存在停站作业，约束条件如式（3-7）所示：

$$x_{k,i} = \begin{cases} 1 & S_i = s_k, e_k, v_k \quad k=1,2,\dots,m \\ 0 & S_i \notin R_k \quad k=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (3-7)$$

式中：\$s_k\$ 为列车 \$T_k\$ 的始发站，\$e_k\$ 为列车 \$T_k\$ 的终到站，\$v_k\$ 为列车 \$T_k\$ 的重点车站。\$R_k\$ 表示列车 \$T_k\$ 的开行区段。

(5) 取值范围约束

变量 \$x_{k,i}\$ 描述列车 \$T_k\$ 在车站 \$S_i\$ 停与不停两种情况，是 0-1 决策变量，取值范围为

$$x_{k,i} = \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,n \quad k=1,2,\dots,m \quad (3-8)$$

变量 \$q_{k,i,j}\$ 为列车 \$T_k\$ 上从车站 \$S_i\$ 到车站 \$S_j\$ 的旅客数量，取值范围为

$$q_{k,i,j} \geq 0 \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad j=2,3,\dots,n \quad i < j \quad k=1,2,\dots,m \quad (3-9)$$

变量 \$c_k\$ 为列车 \$T_k\$ 的额定载客量，为方便计算，高速铁路 8 节编组列车的额定载客量通常取 600，16 节编组列车的额定载客量通常取 1200，取值范围为

$$c_k = \{600,1200\} \quad k=1,2,\dots,m \quad (3-10)$$

3.6 模型分析

因此，综上所述该优化模型可以表示为

$$\min Z_1 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{k,i} \quad (3-11)$$

$$\min Z_2 = \sum_{k=1}^m (c_k D_k - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n q_{k,i,j} d_{i,j}) \quad (3-12)$$

$$\min Z_3 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n \{q_{k,i,j} [\sum_{i<p<j}^n x_{k,p} (t_1 + t_2)]\} \quad (3-13)$$

$$s.t. \begin{cases} q_{i,j} = \sum_{k=1}^m q_{k,i,j} & i=1,2,\dots,n-1 \quad j=2,3,\dots,n \quad i < j \\ c_k \geq \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n q_{k,i,j} \xi_{r,i,j} & k=1,2,\dots,m \quad r=1,2,\dots,n-1 \\ W_1 \leq \sum_{i=1}^n x_{k,i} \leq W_2 & k=1,2,\dots,m \\ x_{k,i} = 1 & S_i = s_k, e_k, v_k \quad k=1,2,\dots,m \\ x_{k,i} = 0 & S_i \notin R_k \quad k=1,2,\dots,m \\ x_{k,i} = \{0,1\} & i=1,2,\dots,n \quad k=1,2,\dots,m \\ q_{k,i,j} \geq 0 & i=1,2,\dots,n-1 \quad j=2,3,\dots,n \quad i < j \quad k=1,2,\dots,m \\ c_k = \{600,1200\} & k=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (3-14)$$

针对上述模型，首先需要进行客流分配来确定每列列车上乘客的上下站点，才能对上述的目标进行求解。

这个模型属于多目标优化模型，求解这种问题大多使用化多为少法、分层序列法、交互规划法等方法^[68]。化多为少法指用特定的函数方法将多个目标合并成一个目标对问题进行求解。大多数情况下会选择线性加权法将使多个目标转化为单个目标，因为这种

方法相较于其他方法来说操作比较简单，也易于理解。但是线性加权平均法只适用于目标类型差别不大，单位大致相同的情况，如果差别较大那么线性加权法则不再适用，转化的结果也不准确。而理想点法则很好的弥补了先行加权法的弊端，它能够适用的问题限制不多，所以本文在对多目标问题的求解上选择了理想点法。

本文所设计的模型是线性规划模型，但想要得到该模型的解所要耗费的精力较多。对这种类型模型的求解已经有一些学者做出了研究，他们使用了分支定界法、动态规划等算法来精确的求解该模型。但是讲这些方法简单的运用到本文所设计的模型的求解上，会造成求解的时间过长，计算十分复杂的弊端。所以，启发式算法更加适合于对本文所设计的模型的求解，目前我们所掌握的启发式算法主要有遗传算法、模拟退火算法与粒子群算法等。结合 0-1 决策变量以及列车停站方案的特点，该模型适合用遗传算法求解。

3.7 本章小结

本章以直线型多始发终到站列车停站方案为研究对象。以总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标，满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束，建立多目标高速铁路列车停站方案优化模型并进行分析。

第四章 高速铁路客流分配方法与优化算法设计

根据上文对模型的描述，该模型需要进行先将客流进行分配，然后运用启发式算法进行求解，在多目标问题的处理方法上选择了理想点法。

4.1 大客流优先分配法

铁路上的客流分配方式与道路上的客流分配方式不同，若把选择不同的列车看作选择路径，路段的阻抗不是随着客流增加而慢慢变化的，而是当乘客数到达额定载客量时，后续的乘客就不能选择乘坐这趟列车。因此不能采取常规的如用户均衡等配流方法。

本文结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点，根据乘客对列车的选择方式，即乘客会选择在途时间最短的列车，提出了一种适用于铁路的客流分配方式，并命名为大客流优先分配法。具体算法思路如下：根据“按流开车”的原则、开行方案的编制原则以及客票分配的原则，可以将客流数量最多的 OD 点对的乘客优先分配上满足乘客上下车、中途停站最少以及运行总里程最短的列车。根据客流数量大小依次分配，最后将所有客流分配完毕。

4.1.1 客流分配模型

上文的算法步骤也可以转变为公式形式，以便理解和使用。

Step1: 需要检索 OD 矩阵中的最大客流量，由于本文的软件平台是 MATLAB，所以可以用 find 函数来表达：

$$q_{i,j} = \text{find}[C = \max(C)] \quad (4-1)$$

式中： $q_{i,j}$ 为从 s_i 站到 s_j 站的客流量， C 为 OD 矩阵中的元素。

这样可以确定最大客流量的数值以及最大客流量的起讫点。

Step2: 选取满足运输条件的列车，对所有的列车 T_k 进行搜索，需要列车满足以下条件，在 s_i 站和 s_j 站都停且在 s_i 站和 s_j 站之间的每个区间都不满员。公式如下：

$$x_{k,i} * x_{k,j} = 1 \quad (4-2)$$

$$q_{k,r} * \xi_{r,i,j} < c_k \quad (4-3)$$

式中： $x_{k,i}$ 为列车 T_k 在 s_i 站是否停站， $q_{k,r}$ 为列车 T_k 在区间 r 上的载客量， $\xi_{r,i,j}$ 为区间 r 是否在 s_i 站和 s_j 站之间。

经过第一步筛选，得到满足条件的列车 T_k 的集合 T_1 。

Step3: 选取用时最短的列车，对所有 T_1 中的列车 T_k ，累加列车从 s_i 站到 s_j 站的停站 0-1 变量，选取其中累加值最小的一列列车或几列列车，也就是从车站 s_i 到车站 s_j 中间

停站次数最少的列车。公式如下：

$$D = \sum_i^j x_{k,i} \quad (4-4)$$

$$E = \text{find}[D = \min(E)] \quad (4-5)$$

式中： D 为列车 T_k 在 s_i 站到 s_j 站的停站数总和形成的两列集合中的第二列元素， E 为列车停站数总和矩阵中第二列最小的元素。

运用 find 函数可以得到停站次数的最小值以及具体是哪几列列车停靠的站点最少，将满足最少停站次数的列车 T_k 组成一个新的列车集合 T_2 。

Step4: 选取里程最短的列车，对所有 T_2 中的列车 T_k 都有对应的行驶里程 D_k ，公式如下：

$$F = \text{find}[D_k = \min(D_k)] \quad (4-6)$$

式中： D_k 为列车 T_k 的行驶里程， F 为列车行驶里程矩阵中的第二列最小的元素。

运用 find 函数可以得到运营里程最短的列车，将满足最短运营里程的列车 T_k 组成一个新的列车集合 T_3 。

Step5: 进行客流分配，对 T_3 中每一个 T_k 继续以下的计算，公式如下：

$$G = c_k - q_{k,r} \quad (4-7)$$

$$H = \text{find}[G = \min(G)] \quad (4-8)$$

式中： G 为额定客流量减去各途径区间的载客量， H 为定员减去载客量矩阵中第二列最小的元素，也就是具体加载到各列车的人数。

然后将选取的 $q_{i,j}$ 减去已经分配完的客流，对 OD 矩阵进行更新。公式如下：

$$q_{i,j}' = q_{i,j} - H \quad (4-9)$$

式中： $q_{i,j}'$ 为更新后返回 OD 矩阵的客流量。

用 $q_{i,j}'$ 替代掉 $q_{i,j}$ ，返回到 OD 矩阵中循环计算。最终 OD 矩阵中的客流全部分配下去就说明停站方案可行，如果分配不下去，说明停站方案不可行。

4.1.2 客流分配算法步骤

客流分配方式的具体算法步骤如下：

Step1: 在客流 OD 矩阵中选取数值最大的数 a ， a 对应了从车站 s_i 到车站 s_j 的旅客数量。

Step2: 在事先生成的 0-1 停站矩阵中选取满足 $x_{k,i}=1$ 和 $x_{k,j}=1$ 且尚未满员的列车，累加列车从 i 站到 j 站的停站 0-1 变量，选取其中累加值最小的一列列车或几列列车，也就是从车站 s_i 到车站 s_j 中间停站次数最少的列车。

Step3: 计算这几列列车的行驶里程长度, 选取其中行驶里程数最短的一列或几列列车, 若是一列列车, 将该列车额定载客量减去车站 s_i 到车站 s_j 之间各区间的已有载客量, 取最小值, 若是几列列车, 将分别计算这几列列车额定载客量减去该列车从车站 s_i 到车站 s_j 之间各区间的已有载客量, 取最小值。

Step4: 若待分配的客流数量小于此最小值, 则将待分配的客流数量全部附加到该列车上或几列列车上, 将客流 OD 矩阵中的对应客流清零, 并转回 **Step1** 进行下一次分配。若待分配的客流数量大于等于此最小值, 则将该最小值的客流附加到列车上。将客流 OD 矩阵中的客流减去已经分配下去的客流, 并转回 **Step1** 进行下一次分配, 若最后 $q_{i,j} - \sum_{k=1}^m q_{k,i,j} = 0$, 则说明该停站方案满足客流需求。若最后 $q_{i,j} - \sum_{k=1}^m q_{k,i,j} > 0$, 则说明该停站方案不合理。

其算法流程图如下:

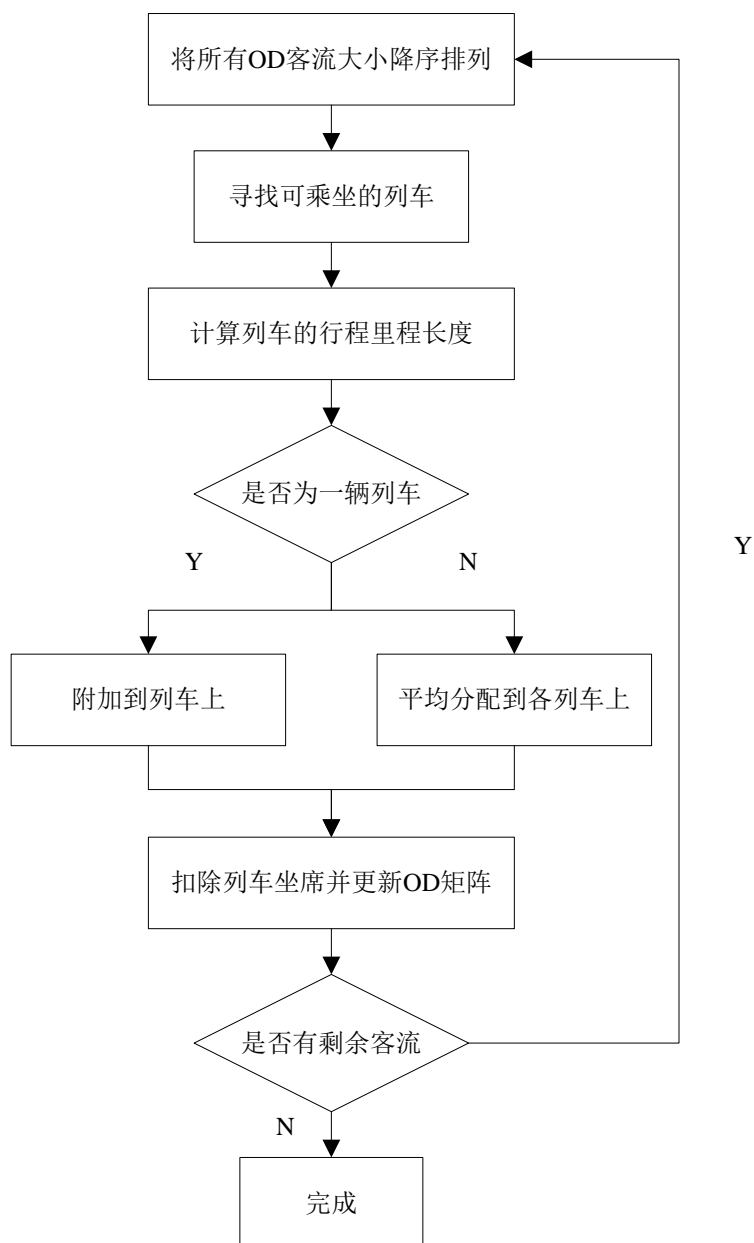


图 4-1 大客流优先分配法流程图

Fig.4-1 Flow Chart of Large Passenger Flow Priority Allocation Method

4.2 遗传算法

4.2.1 遗传算法简介

遗传算法（GA）是参考自然界的遗传进化特点而形成的一种启发式算法^[69]。在生物的遗传进化理论中，将单个的生物物种成为个体，由多个个体组成了物种的种群。每一个个体的差异性是由于个体染色体的不同造成的，而染色体上的基因则是导致个体表现出的性状不同的最终因素。在进化理论当中，一个核心的思想就是优胜劣汰适者生存。选择优质的生物个体，就是选择经过交叉和变异后的优质染色体组。同样的，遗传算法

复刻了这一过程，他的每个解对应着每个个体，解的编码序列决定着解的结果，对编码序列中的编码进行改变，或者组合形成新的编码序列，使目标值不断优化。

生物进化理论概念与遗传算法的概念对应关系如表 4-1 所示。

表 4-1 生物进化理论概念与遗传算法对应关系表

生物进化概念	遗传算法概念
群体	解的集合
个体	解
染色体	解的编码序列
基因	解的每个编码片段
适应性	适应度函数
选择	在种群中选取适应度较大的个体
交叉	按照一定规则形成一组新的解
变异	序列中某个编码发生变化
进化	目标值不断优化

遗传算法参照生物进化理论先设置优质的条件，这个条件就是模型的目标函数。在此基础上构建了一个适值函数。优胜劣汰的过程也是对该函数选择适应性最高的解的过程。由于函数存在多个可能的解的集合，对这个由多个解构成的解集进行不断的较差和变异，使得目标值得到不断的优化，更符合设定的目标函数的要求，那么在此过程的不断往复之下，最终将得到一个最令人满意的解的集合。

遗传算法的第一步是形成最初的解的集合也就是最初的群体，需要首先确定种群当中能够包涵的个体数和会产生多少个种群，初始种群中的元素一般都是研究的对象，第二步是用适当的方法对种群中的个体进行选择，将种群中每个个体达到目标的程度用适应度函数值表示并按照数值大小进行排序从而选择更优的个体。接着对种群的个体进行交叉和变异操作，可以形成新老的个体组成的新的种群，新产生的种群相较于上一代种群更接近最优解，就这样经过反复迭代，迭代终止的条件可以是最大迭代次数也可以是最小误差限制，最终得到一个满意解。

遗传算法本质上是一种搜索算法，它的种群规模可以保留多种可能性，它最终达到的目标是得到全局最优解而不是局部的最优解。因为使用遗传算法中的变异操作可以使获得最优解不会被局限在局部范围内。遗传算法有着全局寻优能力强，能够自主调整寻优方向的特点。

4.2.2 理想点法

因为本文设计的高速铁路列车停站方案优化模型的目标有三个，目标间存在博弈关系且测量单位和取值范围都不相同。一般的权重赋值方法在处理此类问题是会受到主观

因素影响,在处理问题的过程中偏向于其中一个目标,从而导致优化结果的不合理。理想点法具有可以无视不同目标之间单位和数量级差异的优点,因此本文引入理想点法作为遗传算法的适应度函数对多目标问题进行求解^[70],计算方法如下:

首先,利用构建的模型和算法,求解每一个目标优化问题中的最优解。具体步骤是决策变量不变,目标函数选取本次需要求解的目标,约束条件选取全部约束条件,进行客流分配,运用后文设计的遗传算法进行求解,在适应度函数的选择上跟本次需要求解的目标保持一致将个体按照目标依次排列选择。得到一个最优解的集合 F^* :

$$F^* = \{f_1^*, f_2^*, \dots, f_i^*\} \quad (4-10)$$

式中: f_i^* 是第 i 个目标值的最优解,作为期望该目标能达到的值(期望值)。

引入惩罚因子 α_i ,对于每一种停站方案都有一个实际值 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$,目标的实际值和期望该目标能够达到的值之间的距离作为选择最优解的依据,其数学表达式如下:

$$f_i = f_i^* (1 + \alpha_i) \quad (4-2)$$

取适应度函数的最小值,转化后的单目标问题的解即为原多目标问题的解:

$$\min Z' = \sum_i \alpha_i \quad (4-3)$$

4.2.3 遗传算法步骤

本文用遗传算法对设计的高速铁路列车停站方案优化模型进行求解的总体思路如下所示:

(1) 编码

遗传算法的第一步就是对个体进行编码,使用不同的方式进行编码也会对遗传算子方法的选择和其迭代速度造成影响。本文的停站方式优化模型在常用的编码方法的基础上选择了二进制的编码方法。0 表示该列列车在该站选择停站,1 表示该列列车不选择停站,那么对该区段内所有的列车是否停站的情况都用变量 0 和变量 1 表示。那么每一列列车都可以得到其特有的编码结构,也就是对应着个体上的染色体情况。采用这种编码方式有助于直观的描绘出列车的停站情况,这样就会易于后期的处理。每一列上的数据则体现的是在该区段内开行的所有列车在这一特定的站点的停站情况,由于这种特征,那么有多少条编码序列就说明在该区段内有多少量列车运行。但需要注意的是,本文是以京沪高速铁路为例,而京沪高速铁路的线路呈直线型,不同车次在该区段内运行时的起始点可能存在不同,但是为了保证二进制的算法能够清楚直观的描绘列车的停站情况,那么我们认为每条染色体的总长度是一定的,也就是区段内的总站点是固定的。如果该趟列车不经过某一站点,也将其用变量 0 表示,那么得到的总的编码的长度就是固定的,也能够很好的描述出停站的情况。

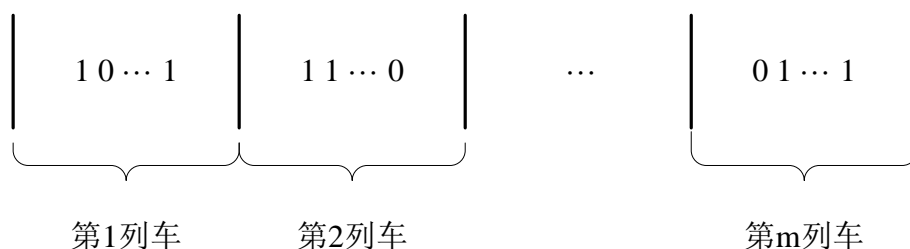


图 4-2 列车停站方案编码图

Fig.4-2 Code of train stop plan

编码需要满足以下三个规范：

1) 完备性：所有的可供选择的解都可以用选择的编码方法进行编码，本文所使用的二进制编码方法可以对所有的列车停站情况进行编码形成染色体，所以具有完备性的特征；

2) 健全性：遗传算法得到的染色体个数就是全部的可选择的解的个数，体现在本文中就是得到的编码序列的个数与列车总列数相同。本文在进行解的构建的时候已经考虑了上文所提到的各种限制条件，初始种群以及在用遗传算法对种群进行更新迭代的过程中必须将上文所描述的限制条件作为依据，判断其是否在限制条件下进行，这样得到的编码才会更加完整和健全，并确保个体的染色体编码与满足上述约束条件的被选集中的可行解是存在互相对应关系的。

3) 非冗余性：各车次在运行区域外的车站基因编码均为 0，因此这些冗余的位点都是没有实际价值的，因此添加约束条件可以使程序在种群初始化和遗传算子运算的过程中很好的避开这些冗余位点，以保证染色体与候选区域内的解相互对应。

(2) 初始化种群

将种群的初始规模定为 100，个体通过上文所提到的二进制编码方式进行编码得到，他们组成的种群也受到上文所描述的约束条件的限制。通过遗传算子的作用机制，使得种群内的个体开始随机且快速的搜索，这种方法下的计算求解所需要的时间较其他方案来说较短。如果需要得到的解得数量比较多，可以扩大种群的规模，并且增大个体搜索的随机性程度，这样就可以更加快速的得到较优的结果。

(3) 适应度函数设计

适应度函数其实对应着生物遗传中选择优劣个体的标准，它也是实现物种自然选择的核心。本文所涉及的模型的目标函数不是单一的，需要满足多个目标函数，所以本文采用了理想点法对多个适应度函数进行转化，使其成为一个单一的适应度函数。

(4) 遗传操作

遗传操作在生物学上就是由于生物的自然繁殖产生新的个体，那么站在优胜劣汰的角度上，新的个体就会带有较优质的基因。体现在算法的求解中也就是说新一代解的适应度要更高。遗传操作的方法有选择、交叉和变异。

1) 选择

选择是整个遗传算法中比较核心的一个内容,要得到适应度更高的解,需要再先前得到的解集的基础上选择会使适应度更高的解,参与到下一次的交叉和变异的操作上,在再在下次得到的解集里继续选择,如此往复得到一个最好的解集。常用的选择方法有轮盘赌选择、锦标赛选择、最佳保留选择、排挤选择等。本文选择了锦标赛选择作为对解进行选择的方法。在这种选择方法下,需要对前一轮的结果和后一轮的结果相比较,比较解集内的对应的解的适应度高低,那么选择使用适应度更高更符合要求的解,而去掉相对不符合目标函数的解。在这种选择方法下,可以保证解集内解的数量不会减少,而且得到的解一定是更加符合要求的。

2) 交叉

染色体上有不同的基因片段,交叉就是让两条染色体上的有些基因进行互换,从而就会有新的染色体产生,与交换的两个染色体都不相同。本文采用了二进制编码得到了编码序列,如果要使用交叉的方式形成新的编码,可以选择的方式有单点交叉、多点交叉、均匀交叉等。本文选择了多点交叉法对编码进行交叉处理。

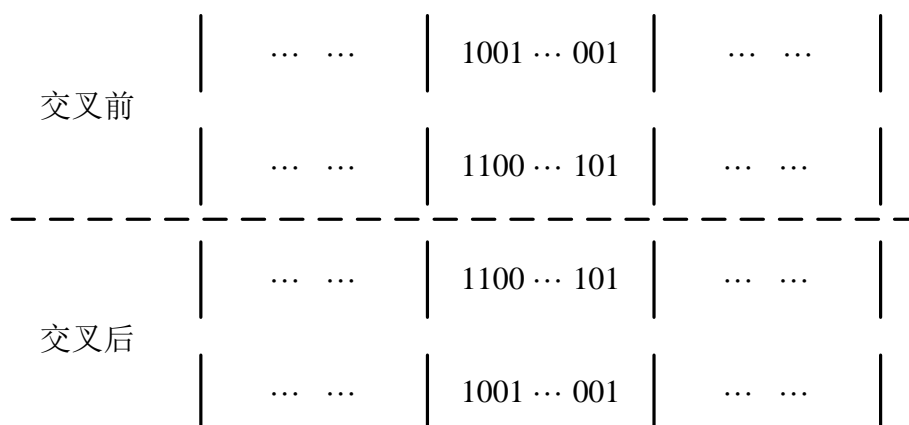


图 4-3 交叉流程图

Fig.4-3 cross flow chart

3) 变异

变异的操作就是随机改变染色体上的基因序列。对于本文选择的二进制方法形成的编码序列来说可以采用的使序列发生变异的方法有基本位变异、边界变异、高斯近似变异等。想要很好得到本文所需要的适应度最高的解,采用变异操作最合理的方法就是基本位变异。具体实践操作是对形成编码的某个编码片段或者某些编码片段实施变异处理。

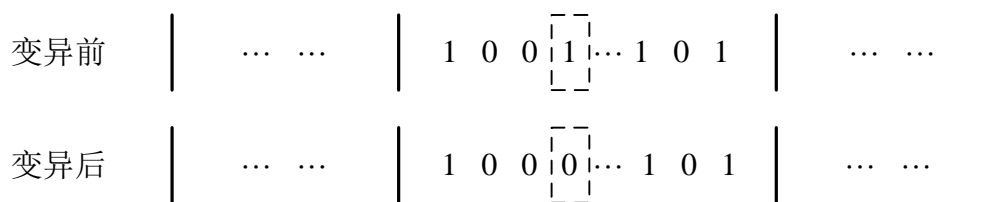


图 4-4 变异流程图

Fig.4-4 Mutation Flowchart

本文设计的遗传算法具体算法步骤如下：

Step1: 初始化，准备相关数据。例如，车站数据，列车数据，客流数据等以及遗传算法的交叉概率、变异概率、种群规模、最大迭代次数。

Step2: 种群初始化。初始化种群 P ，种群大小为 N 。每一个个体代表一个列车停站方案。因为列车在每个站点的停站选择只有停站或者不停站两个选项，就可以简单的用 0 和 1 来将其转化为数学语言表达，这符合二进制编码的特征。将该区段内所有的站点看做是一个基因的位点，那么一辆列车在所有站点上的都可以被 0 和 1 所描述，其形成了一个编码序列即染色体，所有站点的个数就通过染色体的长度来表达。本文定义用 0 来表示列车在途径次站点时选择不停站，而对应的 1 则意味着停站。

Step3: 客流分配。运用上文提到的大客流优先分配法，将所有乘客分配到每一列列车上，若个体不满足客流需求，则在适应度计算时加一个较大惩罚因子，若满足客流需求，则进入下一算法步骤。

Step4: 适应度函数设定。运用理想点法将多个目标函数以单个目标函数的方式去解决现实问题。求解每个目标的最优解作为期望值，通过比较实际值和期望值之间的偏差对个体从小到大进行排序。

Step5: 判别已经完成的往复次数有没有超过既定的迭代次数，如果没有就接着以下步骤再一次进行往复迭代。如果已经达到了设置的迭代次数限制，就停止以下的操作，在目前已经得到的结果的基础上，找到适应度值最好，也就是最符合目标函数的解作为模型的结果输出。

Step6: 以适应度函数的大小为依据，对群体进行排序，采取锦标赛选择，产生新一代种群。

Step7: 对种群中个体的染色体实施交叉操作，在种群中随机选取两个个体进行染色体的交叉处理，将其染色体上的某些基因片段互相置换，这样就能得到新的染色体也就是获得了新的个体。

Step8: 对种群中个体的染色体实施变异操作，随机改变个体上的染色体中的一个基因序列编码，也就是采用了单点变异的方式，在此操作下能够得到新的染色体对应的个体。

Step9: 经过选择、交叉、变异后生成的新种群，转向 Step3 进行计算。

其算法流程图如下：

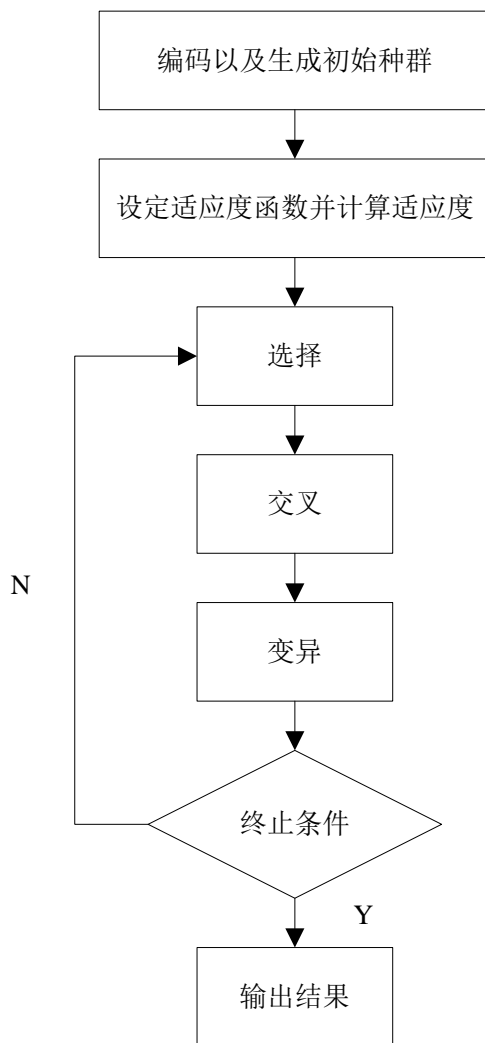


图 4-5 算法流程图

Fig.4-5 Flow Chart of Algorithm

4.3 本章小结

本文结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点,根据乘客对列车的选择方式,即乘客会选择在途时间最短的列车,提出了一种适用于铁路的客流分配方式,并命名为大客流优先分配法。本文构建的模型属于多目标非线性规划问题,想要得到该问题的解需要耗费的成本较大。将各种算法的优势和弊端进行分析考量,采用以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解。本文根据遗传算法的思想,结合模型的实际情况,设计了算法,希望得到模型的满意解。

第五章 算例分析

为更深入阐述本文构建模式及其客流分配方式的有效性，本文以京沪高铁二零一八年某日动车组停站方案的有关资料为例展开了计算分析。

5.1 京沪高铁基本情况

京沪高速铁路从北京南站至上海虹桥火车站，总长一千三百一十八公里，共设二十四个站点，为中国二零一六年制定的《中长期铁路网规划》中“八纵八横”的高铁主通道之一。京沪高速铁路工程于二零零八年四月十八日宣布全面启动，至二零一一年六月三十日，全线正式通车，初期运行时速为三百公里每小时。截止二零一七年九月，京沪高速铁路的设计运行时速为三百五十公里每小时。而截止二零二一年六月三十日，京沪高速铁路已通车运行近十年，累积运送乘客十三点五亿人次。京沪高速铁路从通车经营至今，基建状况良好，运力稳步增长，运营安全秩序可控，截至二零一五年底已累计输送旅客突破四亿人次，基本达到了使广大旅客“平安出游、便捷出游、温馨出游”的目标，并获得了较好的经济效益和社会效益。京沪高速铁路进一步建立了我国的高铁技术标准体系和技术管理体系，有效保障了我国高铁的迅速发展，并形成了科技领先、安全可靠、服务价格比高等的中国国内高铁品牌。以京沪高速铁路为代表的中国高速铁路，已经成为了我国的一张靓丽名片^[71]。

5.2 数据准备

为了保证实验的顺利进行，需要提前准备一些关键数据，包括线路走向、站间距离、站间运行时间、初始停站方案、客流量、停站耗时、单列列车停站次数等数据。

（1）京沪高铁线路走向及站间距

京沪高速铁路共设 24 个车站，天津西站未在主线上，为方便计算，将天津西站和天津南站都统计为天津站，统计为 23 个站。23 个车站将线路划分为 22 个区间，各站间距如下图所示。

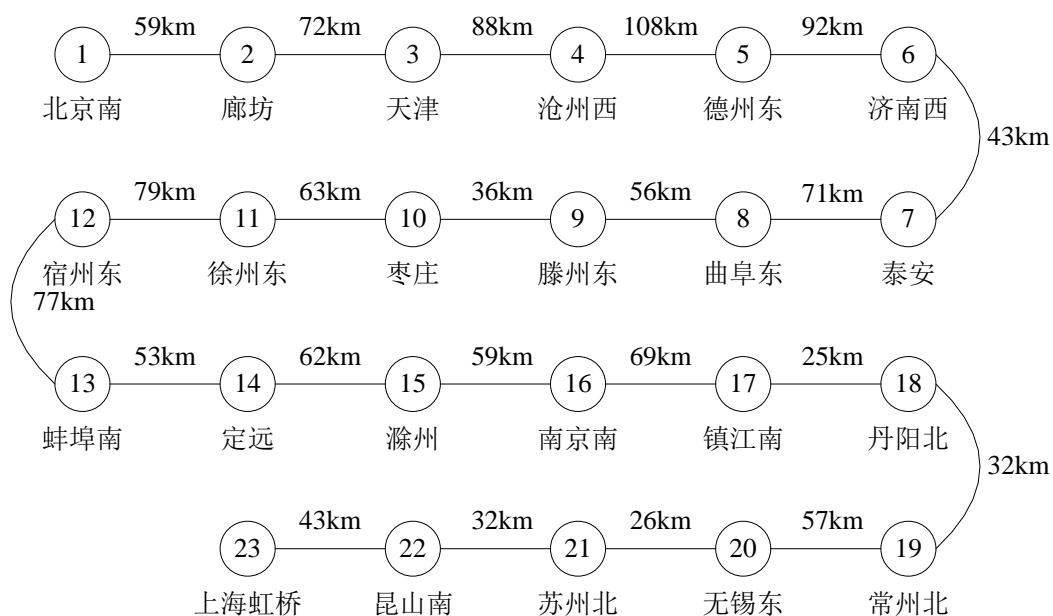


图 5-1 京沪高铁运行线路图

Fig.5-1 Beijing-Shanghai high-speed rail operation route map

(2) 站间旅行时间

表 5-1 给出了京沪高铁列车实际站间旅行时间。

表 5-1 京沪高铁列车实际站间旅行时间表

车站区间	旅行时间（分钟）
北京南-廊坊	21
廊坊-天津	18
天津-沧州西	22
沧州西-德州东	27
德州东-济南西	24
济南西-泰安	17
泰安-曲阜东	19
曲阜东-滕州东	17
滕州东-枣庄	13
枣庄-徐州东	18
徐州东-宿州东	19
宿州东-蚌埠南	23
蚌埠南-定远	16
定远-滁州	19
滁州-南京南	18

南京南-镇江南	20
镇江南-丹阳北	11
丹阳北-常州北	11
常州北-无锡东	17
无锡东-苏州北	10
苏州北-昆山南	11
昆山南-上海虹桥	18

(3) 初始停站方案

参考的停站方案为 2018 年某日京沪高铁下行列车停站方案, 列车总数 $m=62$ 列。各列车始发终到站均确定。编组辆数均为 16 辆, 列车定员 $c_k=1200$ 人, 如表 5-2 所示。

表 5-2 京沪高铁列车停站方案基本参数

参数名称	数量
列车总数	62 列
列车编组数	16 辆
列车定员	1200 人

(4) 区段内客流量

客流数据为 2018 年某日京沪高铁下行列车客流, 如表 5-3 所示。

表 5-3 2018 年某日京沪高铁下行列车客流表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1		4701	5252	3023	2088	5905	1662	1682	413	629	2467	340	522	36	187	5726	609	87	880	1188	1753	278	10503	
2			553	237	99	200	43	32	5	9	101	5	15	0	4	115	2	1	12	16	23	4	156	
3				929	527	1175	232	339	56	84	478	55	100	5	29	868	67	12	154	219	297	52	1298	
4					159	387	85	53	18	21	180	13	25	1	5	211	26	4	34	58	58	16	320	
5						871	211	155	36	58	158	13	24	1	7	175	12	1	27	42	48	7	324	
6							1273	1284	582	915	715	85	129	11	47	1306	145	22	209	275	390	91	2125	
7								450	138	223	321	25	45	3	17	311	28	4	39	64	77	24	515	
8									100	223	327	20	48	3	15	398	34	4	75	86	117	28	819	
9										37	237	13	23	1	6	146	4	1	13	22	36	12	227	
10											526	9	44	1	6	303	13	2	30	50	73	12	439	
11												312	367	47	141	4767	315	50	617	678	1035	307	2633	
12													154	20	62	775	22	8	83	88	131	64	640	
13															44	188	1727	65	22	156	180	219	120	1514
14																42	456	6	3	23	29	43	25	145
15																	1435	17	8	46	57	109	50	463
16																		1215	121	1697	1282	1581	807	10507
17																			16	197	121	189	85	1608

18																	17	30	18	20	131
19																		334	478	188	2288
20																			663	314	3569
21																				273	3569
22																					1837
23																					

（5）列车在车站的停站耗时

上文也对列车的运行特点进行了分析，可以发现列车在车站停站的时长于列车自身等级的高低和车站等级的高低有着非常紧密的联系。列车等级越高，车站等级越高，那么列车在该车站的停站的耗时倾向于更长的时间，对于不需要在这些中间站停靠的旅客来说，他们的旅行时间也就被迫延长了。本文重点是对列车停站方案的优化，是针对在该区段内列车停站次数的优化，所以暂且不考虑列车在每个不同的站点停站时长的不同，并将它们视为一个统一的值。列车的停站时长由列车停站的时间和列车起停附加时间所构成，那么就可以通过用历史数据对两个值进行规定而得到本文所需要的列车停站总耗时来方便对列车停站方案的优化。本文在京沪高速铁路大量的历史数据进行了统计和分析的基础上并结合以往的研究，得出一般情况下可以认为，京沪高速铁路列车的停站时间大致为 2 分钟，起停附加时间分别为 1 分钟和 2 分钟，那么对这两个时间进行加总，就可以得出京沪高速铁路列车在车站的总停站耗时为 5 分钟，也就是说乘客会因为列车每多停站一次会被迫增加 5 分钟的在途时长。

（6）单次列车停站次数

通过对京沪高速铁路现有的停站模式的研究可以发现，京沪高速铁路列车一般是使用了大站停和择站停的停站模式，极少情况下会使用到站站停模式和一站直达式。因为这两种停站模式的使用范围比较特殊，站站停模式一般适用于距离较短的情况，比如，在京沪高铁运行区段中，北京南到天津区段由于区段的里程较短，可以采用站站停的模式。一站直达模式也适用于比较短的区段，比如，北京南到廊坊、北京南到天津这两个短距离的区段选择了一站直达式。在京沪高速铁路的区段内，其余大多都是中长距离的区段，就不适用这两种模式。

在京沪高速铁路的区段内一共有 24 个不同等级的车站，如果在所有距离的区段的每个站点都停车的话，在一定程度上会造成运能的浪费，不利于铁路运输部门的管理经济效益，并且旅客也会因为被迫延长了在途旅行时间而降低了他们的出行幸福感。对于列车自身来说，停靠的站点越多，那么它们在该区段内的行驶平均速度就会降低，运行时长就会提高，相应的就会造成成本费用浪费，出现事倍功半的不良后果。京沪高速铁路列车一般会采用择站停的模式，并不会在沿途 24 个站点都进行停站，我们对现有的列车的停站情况进行统计分析后发现，京沪高速铁路列车在包含起始站和终到站的情况下，单次列车最多停靠了 16 个站点。所以在对京沪高速铁路列车停站方案进行优化时，本文将其最大的停站次数设定为 16 次。最小单次列车停站次数是当列车仅在始发

站和终到站停站的总停站次数，也就是 2 次。

由于京沪高铁动车组经过南京南站必须停车，因此在算例中将经过南京南站的列车都强制停车。

5.3 计算过程

为验证算法的有效性，本文采用电脑 CPU 为 2.6 GHz 六核 Intel Core i7，内存为 16GB，MATLAB 2019b 进行求解。对遗传算法的参数进行设置：经过计算实验和参考前人的研究成果，将遗传算法的最大迭代次数设定为 500 次，将初始种群规模设定为 100，将交叉概率设定为 0.8，将变异概率设定为 0.2。由于本文设置了三个目标函数，所以先要分别对各目标进行单目标求解，计算出各自的期望值，计算出的各目标期望值分别为 $f_1 = 438$, $f_2 = 35557627$, $f_3 = 706390$ 。再利用理想点法将三个目标函数结合，转化为单目标问题，求解得到多目标优化后的京沪高铁列车停站方案。算法参数设置如表 5-3、5-4 所示：

表 5-3 算法参数设置表

参数名称	数值
最大迭代次数	500
初识种群规模	100
交叉概率	0.8
变异概率	0.2

表 5-4 理想点法期望值设置表

期望值	数值
总停站次数	438
列车空费能力	35557627
旅客损失时间	706390

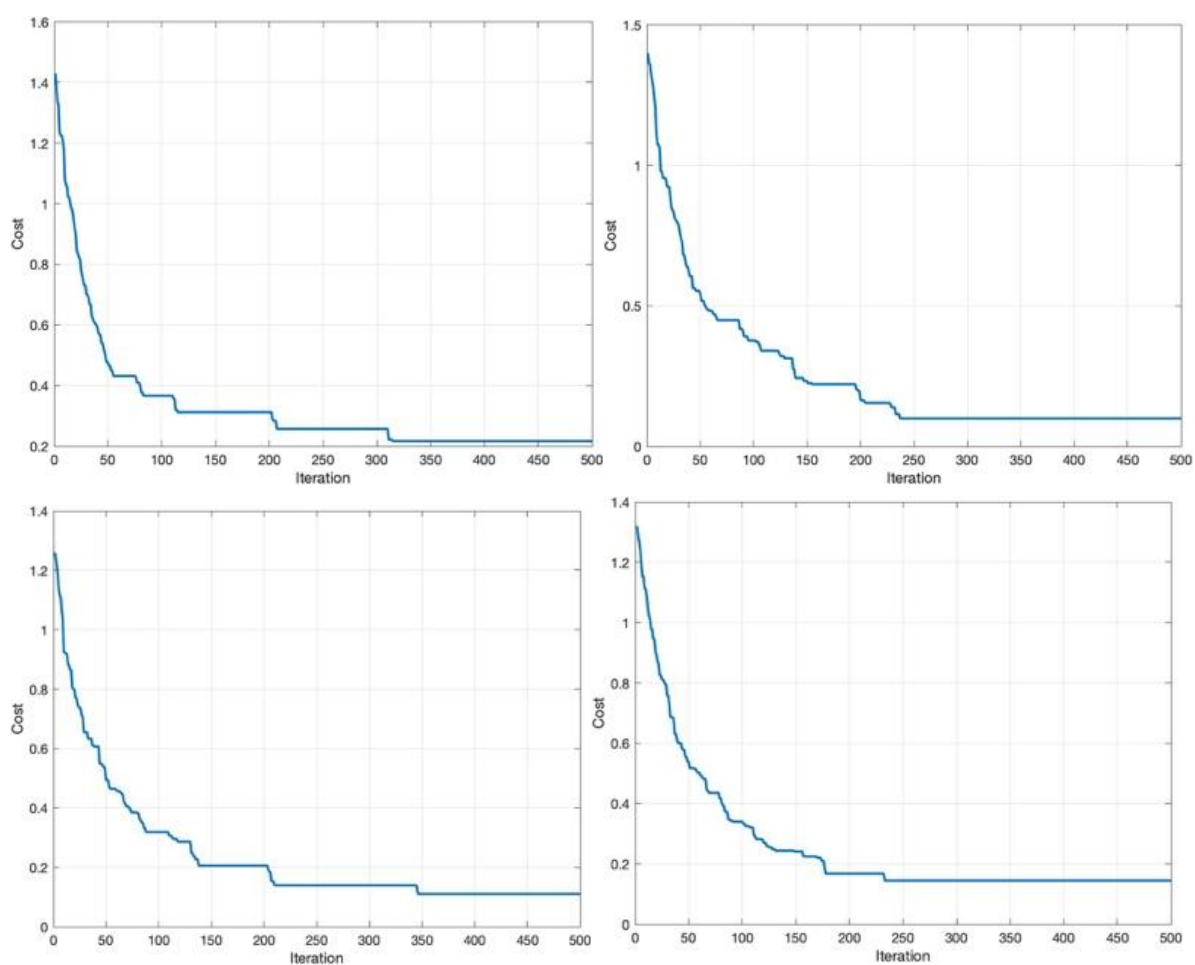
进行十次计算结果如表 5-5 所示：

表 5-5 计算结果表

次数	计算结果	稳定时迭代次数
1	0.214	312
2	0.117	238
3	0.111	346
4	0.145	233

5	0.132	323
6	0.124	277
7	0.164	352
8	0.115	233
9	0.128	378
10	0.131	456

迭代图如下所示。



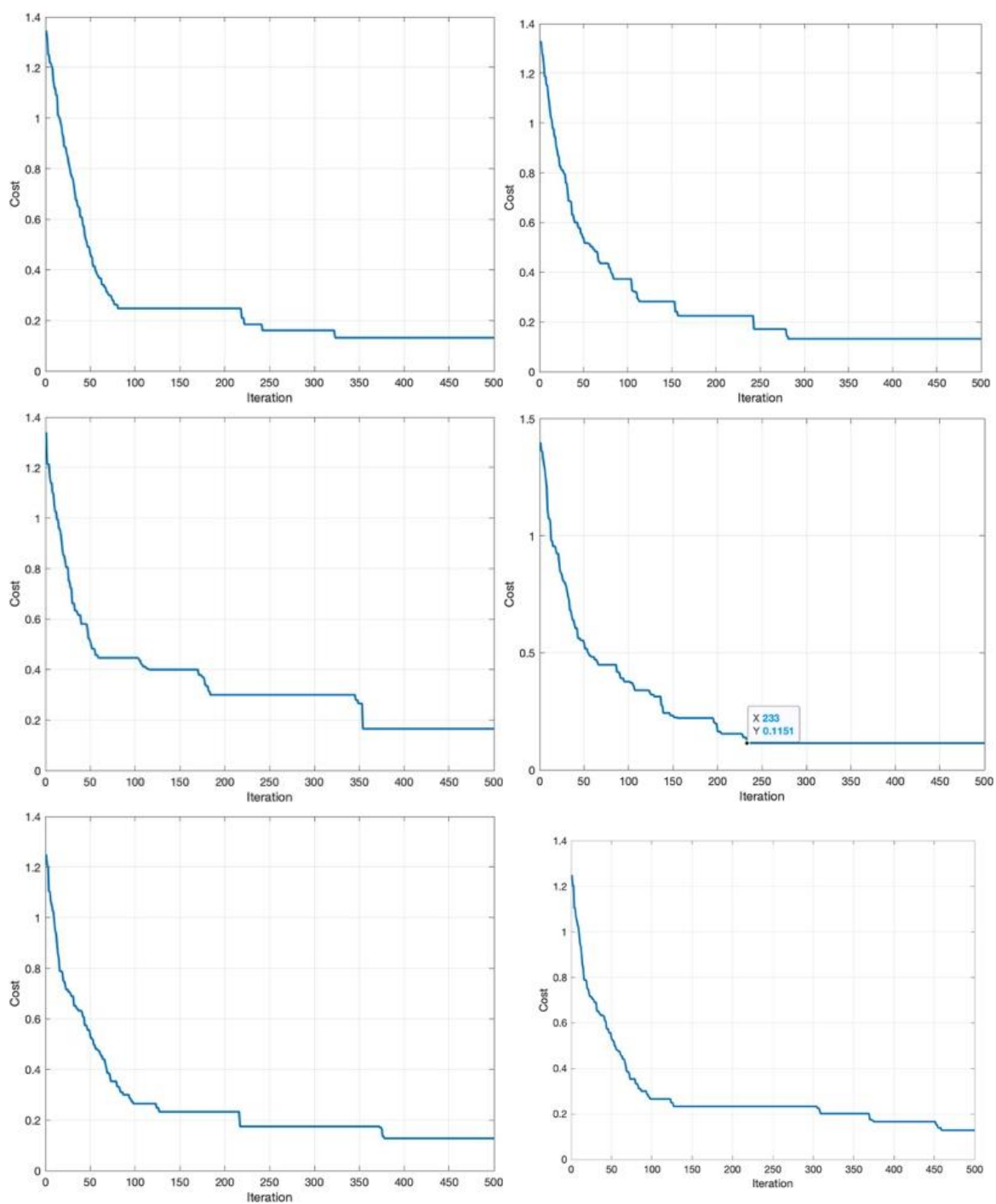


图 5-2 十次计算迭代图

Fig.5-2 Ten calculation iteration graph

由于初始种群的不同，每一次迭代过程、收敛速度都不相同，计算结果也可能不相同。但趋势大致相似，在前一百次迭代过程中迅速收敛，一般在 300 次计算左右稳定。选取最优的第三次计算结果作为优化结果。第三次计算迭代图如图 5-3 所示：

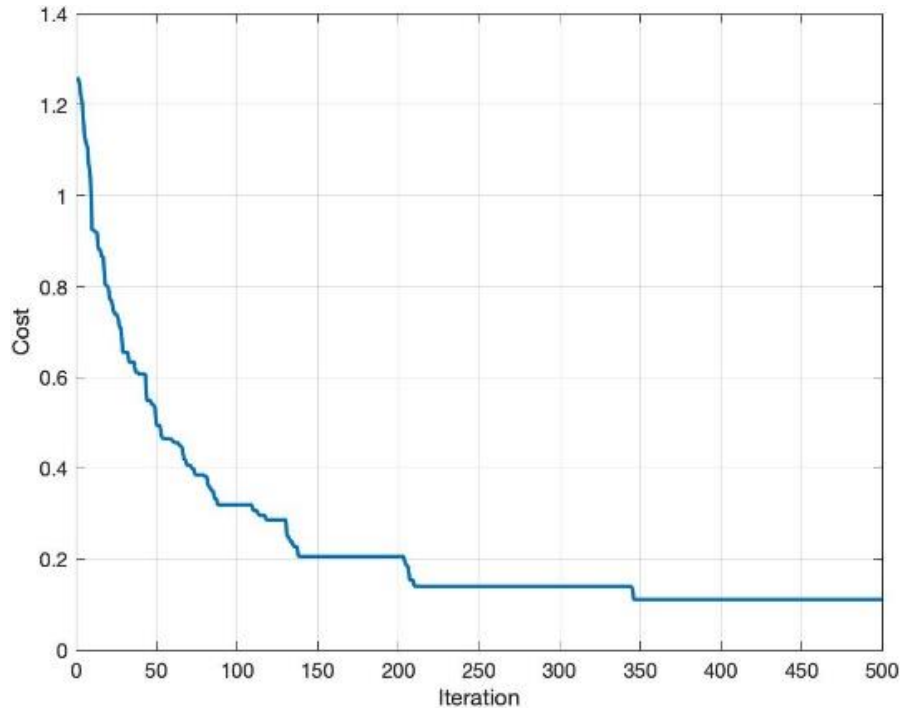


图 5-3 第三次计算迭代图

Fig.5-3 The third calculation iteration graph

由图可见，算法在第 346 代后趋于稳定，转化后的单目标问题最小值为 0.111。优化后的列车停站方案如下所示。

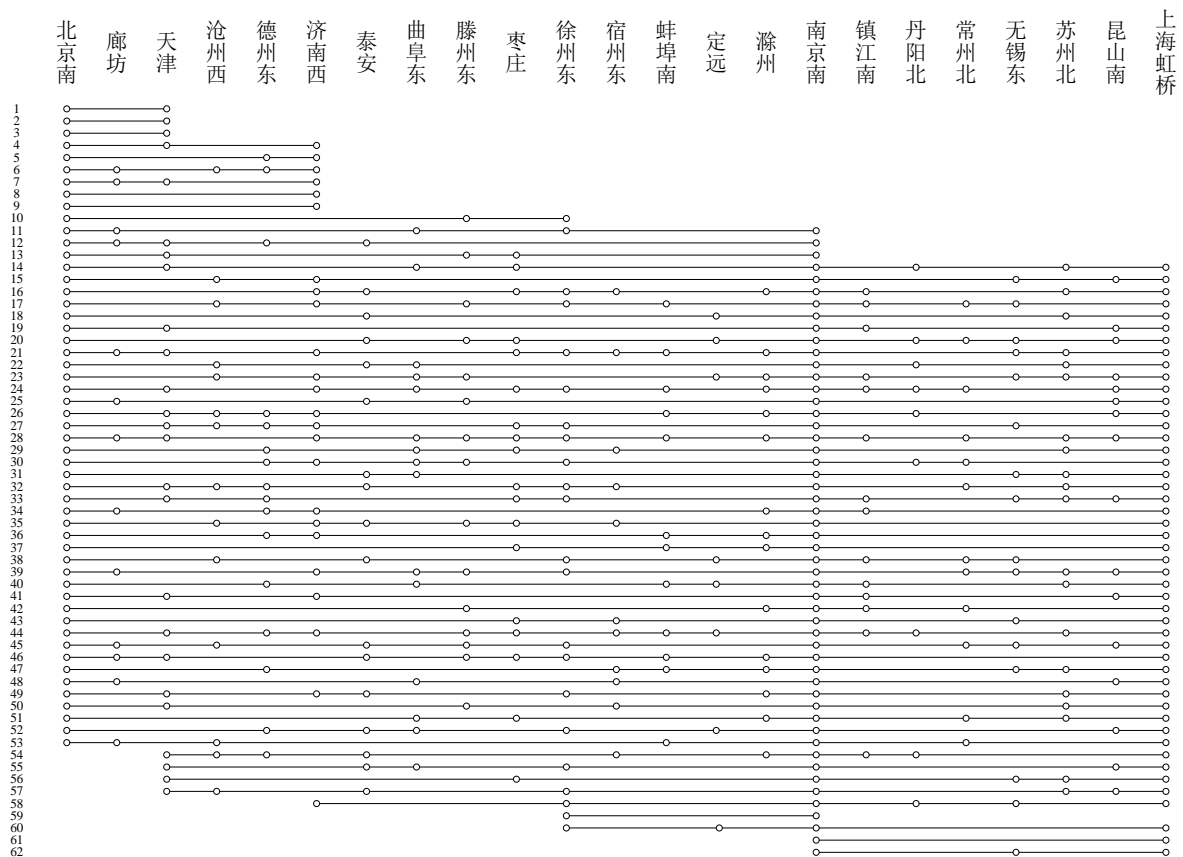


图 5-4 优化后的列车停站方案

Fig.5-4 Optimized train stop plan

5.4 结果分析

本文提出的优化方法得到的新列车停站方案与现有列车停站方案在几个方面做比较, 结果如表 5-6 所示。

表 5-6 列车停站方案对比表

	原列车停站方案	优化后的列车停站方案
总停站次数	505	465
列车空费能力	45236534	36257241
旅客损失时间	1243400	727065

该列车停站方案优化后的总停站次数为 465 次, 优化前的原始停站方案的总停站次数为 505 次, 减少了 40 次, 优化了 7.92%。该列车停站方案的列车空费能力为 36257241, 优化前的原始停站方案的列车空费能力为 45236534, 减少了 8979293, 优化了 19.84%。该列车停站方案的旅客损失时间为 727065min, 优化前的原始停站方案的旅客损失时间为 1243400min, 减少了 516335min, 优化了 41.52%。

通过比较列车停站方案优化前后的三个目标函数的值的变化可以看出, 无论是总停站次数方面还是列车空费能力和旅客损失时间方面都得到了一定的改善。特别是旅客的损失时间得到了比较大程度的改善, 使用新的列车停站方案可以减少旅客的不必要时间损失, 增加旅客的乘坐快捷性, 增加旅客出行的幸福程度。

通过对三个目标函数改善程度的内部比较可以发现, 基于本文的优化方案, 列车总停站次数和列车空费能力虽然也得到了一定程度的优化但改进程度没有旅客损失时间的改进程度大。这是因为本文提出了一种新的客流分配方案, 称为大客流优先分配法。这种方法的优点是可以极大程度的减少旅客因列车停站而损耗的时间。但是为了满足旅客的出行需求, 有些站点是必须要停靠的, 因而就不能过度的使停站的总次数降低, 过度降低则可能面临达不到旅客出行需求的情况, 而浪费客流需求。所以针对列车总停站次数的优化效果没有那么明显, 但是本文的优化结果也可以使一些不必要的停站消除, 而达到第一个目标函数的优化。因此, 本文的研究成果是有一定的实际意义的, 在实际的停站方案制定上是可以起到一定的有利影响的, 从而可为其他路线的列车停站方案的制定提供合理参考。

5.5 本章小结

本章结合京沪高铁的具体情况, 以京沪高铁一日列车停站方案为例。求解并比较可

以得到优化后的列车停站方案可以最大程度的节约成本，实现利益最大化。通过减少旅客因为列车停站而被迫损失的出行时间，使长距离乘客的出行体验得以优化，实现了乘客与企业的双赢。

第六章 结论与展望

随着人民生活水平的日益提高以及居民消费理念的转变，人们对出行数量和品质的需求都发生了翻天覆地的改变。由于高速铁路具有行驶速度快、载客量大、安全程度高及出行条件好等优点，逐渐成为了当代旅客最喜爱的一种出行方式。但由于高速铁路覆盖范围的逐渐增大，客流需求日益变动，组织高速铁路运营工作的复杂程度也日益增大。所以，在满足日益变动的客流需求的基础上，如何将各种运力资源更为合理且科学经济的分配是运营部门必须解决的重大问题。良好的列车停站方案可以达到提高旅客出行效率、节约列车运行成本、吸引客流的目的。本文对目前学者们在此方面的研究进行了分析，结合现有研究的不足之处，提出了基于大客流优先分配的高速铁路列车停站方案优化研究。然后通过建立数学模型，提出适用于高速铁路的客流分配方法，设计遗传算法，结合京沪高铁的算例对设计的模型和算法进行验证。研究成果表明，优化后的高速铁路列车停站方案能够减少该区段内列车的停车次数，并且在保证上座率的情况下缩短旅客出行所需要花费的时间，有助于增加旅客的出行幸福度以及提升铁路管理部门的经济效益。

6.1 主要工作内容与结论

本文针对现有研究的不足，对高速铁路列车停站方案进行系统的研究。结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点，根据乘客对列车的选择方式，即乘客会选择在途时间最短的列车，提出了一种适用于铁路的客流分配方式，并命名为大客流优先分配法。将客流分配到每一列列车上，为停站方案制定、开行方案制定、客票分配等环节奠定基础。同时建立了以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标，满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束的多目标高速铁路列车停站方案优化模型，并设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解，以京沪高速的列车停站情况为例，验证了本文所设计的模型及算法是有实际的应用价值的。本文以此为方向主要得到了以下结论：

(1) 本文对以往学者对列车停站方案优化以及高速铁路客流分配方法的研究进行了大量的阅读，并对其进行总结和概括，并结合目前高速铁路列车停站方案中存在的问题和需要改进的地方进行研究，所以本文的研究成果对于实际应用方面存在一定的借鉴价值。

(2) 介绍了有关列车停站方案的理论基础，其中重点对列车停站方式及组合模式进行了分析，并且分析了传统交通量分配的基本方法以及论证传统客流分配方式不适用于高速铁路客流分配。

(3) 以第二章的理论分析为基础，分析了高速铁路列车停站方案的影响因素，对

高速铁路列车停站方案进行数学描述,进行建模假设,构建以列车总停站次数最小、列车空费能力最小、旅客时间损失最小为目标,满足客流约束、列车运输能力约束、每辆列车停站次数约束、始发终到站及重点车站停站约束的多目标高速铁路列车停站方案优化模型。

(4) 结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点,根据乘客对列车的选择方式,即乘客会选择在途时间最短的列车,提出了一种适用于铁路的客流分配方式,并命名为大客流优先分配法。将客流分配到每一列列车上,为停站方案制定、开行方案制定、客票分配等环节奠定基础。并设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解。

(5) 利用上文的高速铁路列车停站方案优化模型,对既有的京沪高速铁路停站方案进行优化,并与初始列车停站方案进行对比,求解并比较可以得到优化后的列车停站方案可以最大程度的节约成本,实现利益最大化。通过减少旅客因为列车停站而被迫损失的出行时间,使长距离乘客的出行体验得以优化,实现了乘客与企业的双赢。

6.2 创新点

本文在对以往学者对于列车停站方案研究进行概括总结的基础上,发现其可以进一步研究的地方,具体如下:

(1) 现有对停站方案的研究大多是与列车的开行方案的研究一起进行,他们在进行方案优化时,把对停站方案的优化视为开行方案优化的一个小点。这就造成了许多学者在优化开行方案时简化了列车停站问题,仅仅将列车停站方案作为开行方案优化的一个输入条件,在此前提下对模型的优化就没有充分考虑到停站方案的不同带来的不同影响。所以,为了弥补这一部分的缺陷将高速铁路停站方案单独作为研究对象是十分必要的。因此,本文单独针对高速铁路列车停站方案优化进行细化和深入探讨。

(2) 目前大多数学者在进行铁路上的客流分配的过程中一般采用全有全无法、用户均衡模型或随机用户均衡模型,或将客流量当作约束条件考虑。本文结合铁路运输“按流开车”、大客流优先的特点,根据乘客对列车的选择方式,即乘客会选择在途时间最短的列车,提出了一种适用于铁路的客流分配方式,并命名为大客流优先分配法。将客流分配到每一列列车上,为停站方案制定、开行方案制定、客票分配等环节奠定基础。

(3) 现有的研究在模型的求解算法选择上大多是采用了将其制定的各优化目标函数进行加权,形成一个单一的目标。也就是将多目标优化问题转化成了单目标优化问题。但是这样做的弊端是没有给出详细的给目标进行加权设置的加权系数的理由,这也使得最终优化后的结果存在很大的主观性,同时就会导致局部收敛。理想点法具有可以无视不同目标之间单位和数量级差异的优点,本文设计了以理想点法为适应度函数的遗传算法进行求解。

6.3 研究展望

本文对基于大客流优先分配法的高速铁路列车停站方案进行了初步研究，并取得了一定的成果，但是仍有不足之处，今后还需要对以下几个方面进行深入的研究和完善：

（1）关于客流分配方法，今后要进一步考虑乘客的需求，研究乘客选择列车的特点，根据乘客选择列车的多元化特点，建立一个合理的客流分配模型。

（2）列车停站方案作为列车开行方案的重要组成部分，对列车停站方案优化进行深入研究，目的是为了对开行方案的优化研究打下坚实的基础。将已有的研究成果搬到开行方案优化的研究中去。

（3）本文研究的是直线型线路的列车停站方案，今后还需进一步对多条线路甚至网络化的列车开行方案优化进行研究。

参考文献

- [1] 闫宏伟,沈志凌,吴歆彦,赵泽宇.《高速铁路设计规范》等标准信号部分局部修订解析[J/OL].铁道标准设计:1-5[2022-03-14].DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202108240003.
- [2] 杨敏,李然,倪少权.基于经济效益的高速铁路列车开行方案评价及调整[J].铁道科学与工程学报,2021,18(11):2824-2832.DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210004.
- [3] 贾飞,孟学雷,贾宝通,李涛,张杨.突发公共卫生事件下高速铁路客流分配研究[J].中国安全科学学报,2021,31(06):153-160.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.06.020.
- [4] 孙海富.中国高速铁路安全保障体系[J].铁道工程学报,2021,38(06):93-97.
- [5] 薛锋,范千里,胡萍,李青青.基于遗传层次分析法的高速铁路运营统计指标筛选[J].交通运输工程与信息学报,2021,19(01):168-176.
- [6] Qi, J., Cacchiani, V., Yang, L., Robust train timetabling and stop planning with uncertain passenger demand [J]. Electronic Notes Discrete Math, 2018b, 69, 213–220.
- [7] Qi, j., Li, S., Gao, Y., Yang, K., Liu, P., Joint optimization model for train scheduling and train stop planning with passengers distribution on railway corridors [J]. Oper. Res. Soc, 2018a,69 (4), 556–570.
- [8] Qi, J., Yang, L., Di, Z., Li, S., Yang, K., Gao, Y., Integrated optimization for train operation zone and stop plan with passenger distributions [J]. Transp. Res. E, 2018c, 109, 151–173.
- [9] 张拥军,任民,杜文.高速列车开行方案研究[J].西南交通大学学报,1998(04):42-46.
- [10] 查伟雄,符卓.直通旅客列车开行方案优化方法的研究[J].铁道学报,2000(05):1-5.
- [11] 何宇强,张好智,毛保华,陈团生.客运专线旅客列车开行方案的多目标双层规划模型[J].铁道学报,2006(05):6-10.
- [12] 史峰,邓连波,霍亮.旅客列车开行方案的双层规划模型和算法[J].中国铁道科学,2007(03):110-116.
- [13] 徐行方,向劲松.区域性城际列车开行方案的研究[J].同济大学学报(自然科学版),2008(05):620-624.
- [14] 陈虎,贾俊芳.高速铁路旅客列车停站方案问题的研究分析[J].物流技术,2011,30(07):14-15+36.
- [15] 黄鉴,彭其渊.高速列车停站优化问题的两阶段求解算法[J].西南交通大学学报,2012,47(03):484-489.
- [16] 冯亮.沪宁城际铁路停站方案优化研究[J].上海铁道科技,2012(04):19-20+8.
- [17] 赵洪诚,王金香,张骥.基于可达性的高速铁路列车停站方案优化研究[J].铁道运输与经济,2012,34(09):36-39.
- [18] 徐斌. 高速铁路列车停站方案研究[D].北京交通大学,2012.
- [19] 冯旭杰,孙全欣,冯佳,吴珂琪.高速铁路既有停站方案优化模型[J].交通运输工程学报,2013,13(01):84-90.DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2013.01.013.
- [20] 李得伟,韩宝明,李晓娟,张洪军.基于节点服务的高速铁路列车停站方案优化模型[J].铁道学报,2013,35(06):1-5.
- [21] 吕红霞,涂玉渊,孙守平,杨昌休.基于车站服务频率的高速列车停站设置研究[J].铁道运输与经济,2014,36(08):32-37.
- [22] 牛丰,戚建国,秦进.基于不确定客流的高速铁路列车停站方案优化方法[J].铁道学报,2016,38(07):1-7.
- [23] 黄林尧,吕红霞,杜毓祥,王文宪.基于节点重要度的高速列车停站方案优化[J].交通运输工程与信息

- 息学报,2017,15(03):49-57.
- [24] 张小炳,倪少权,潘金山.基于均衡性和可达性的高速铁路列车停站方案优化[J].计算机应用研究,2017,34(07):1962-1965.
- [25] 赵杰群,李夏苗,苟敏.基于区间数的高铁列车停站方案优化方法[J].铁道科学与工程学报,2017,14(06):1130-1136.DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.06.003.
- [26] 张旭,陈秉智,孟璐.基于多目标的丹大城际停站方案优化研究[J].铁道学报,2018,40(08):9-18.
- [27] 毕明凯,何世伟,黎浩东,殷玮川,景云.基于随机客流 OD 的市郊铁路停站方案优化研究[J].铁道学报,2018,40(10):1-7.
- [28] 闫海峰,于丽.高速铁路列车停站方案优化研究[J].交通运输工程与信息学报,2019,17(03):8-16.
- [29] 简星,闫海峰,张守帅.基于能力利用的高速铁路列车停站方案优化模型[J].交通运输工程与信息学报,2019,17(02):146-152.
- [30] 刘璐,孟令云,李新毅,刘岗.考虑旅客需求的停站方案与列车运行图一体化模型与算法[J].铁道科学与工程学报,2019,16(02):518-527.DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.02.031.
- [31] 高明瑶,石红国.城际铁路列车停站方案的遗传算法求解[J].铁道运输与经济,2020,42(03):49-53.DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2020.03.09.
- [32] 许若曦,聂磊,付慧伶.面向提升旅客出行效率的高速铁路列车停站方案优化[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(02):174-180.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.02.026.
- [33] 张涛,孙鹏举,曲子贤.高峰时段城际铁路列车停站方案研究[J].铁道运输与经济,2021,43(02):7-15.DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2021.02.02.
- [34] 秦永胜,孟学雷,沈发才,张丰婷,刘仁华.基于动车组接续的高速铁路列车停站方案设计研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(09):2271-2279.DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200967.
- [35] 邓连波,史峰,周文梁.旅客列车停站设置方案优化[J].中国铁道科学,2009,30(04):102-107.
- [36] 聂磊,胡小风,佟璐,付慧伶.基于旅客列车开行方案的客流分配方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(03):87-92.
- [37] 佟璐,聂磊,付慧伶.基于复杂列车服务网络的客流分配方法研究[J].铁道学报,2012,34(10):7-15.
- [38] 豆飞,贾利民,徐杰,王莉,黄雅坤.基于组合熵优化的铁路客运网配流方法[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(01):216-221.
- [39] 王正彬,闫海峰,徐昌贵.基于物理路网的高速铁路客流分配优化研究[J].铁道运输与经济,2017,39(12):61-64+90.DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2017.12.12.
- [40] 赵烁,史峰,胡心磊,徐光明,单杏花.考虑售票策略的高速铁路客流分配方法[J].铁道学报,2018,40(09):12-21.
- [41] 史峰,付碧帆,徐光明.基于时刻表的高速铁路客流分配分解方法[J].中国铁道科学,2020,41(06):164-175.
- [42] 倪少权,杨皓男,彭强.基于乘客路径选择的多制式轨道交通客流分配[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(01):108-115.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.01.017.
- [43] 李文卿,倪少权,杨渝华,文迪.基于开行方案的高速铁路客流分配方法研究[J].铁道学报,2021,43(03):1-8.
- [44] 蔡芸,王涛,樊昊煜,司晓鑫,黄志鹏.基于时段偏好的高速铁路列车停站方案双层规划方法[J].铁道运输与经济,2021,43(03):79-87.DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2021.03.13.
- [45] Eisele.D.O., Application of zone theory to a suburban rail transit network [J].Traffic Quarterly,1968, 22:49-67.

-
- [46] N.S.A.Ghoneim, S.C.Wirasinghe, Zone structure during peak periods for existing urban rail lines [J]. Transportation Research B, 1986.20(1):7-18.
 - [47] Sone S.Novel, train stopping patterns for high-frequency,high-speed train scheduling[A].Computers in railways,computational mechanics publications, U.K, PP.107-118, 1992.
 - [48] Michael R. Bussieck, Peter Kreuzer, Uwe T. Zimmermann. Optimal lines for railway systems[J]. European Journal of Operational Research. 1996, (96):54-63.
 - [49] Yu-Hern Chang,Chung-Hsing Yeh,Ching-Cheng Shen. A multiobjective model for passenger train services planning: application to Taiwan's high-speed rail line [J]. , 2000, 34(2).
 - [50] Jan-Willem Goossens, Stan van Hoesel,Leo Kroon. On solving mufti-type railway line planning problems [J]. European Journal of Operational Research 2006, 168(2):403-424.
 - [51] Park B H, Chung-Soo K, Hag-Lae R. On the Railway Line Planning Models Considering the Various Halting Patterns[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2010, 2182(1).
 - [52] Jong J C, Suen C S, Chang S. Decision Support System to Optimize Railway Stopping Patterns[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2012, 2289:24-33.
 - [53] Yang L, Qi J, Li S, et al. Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on high-speed railways[J]. Omega, 2016, 64:57-76.
 - [54] Carrizosa E, Harboring J, Schöbel A. Minimizing the passengers' traveling time in the stop location problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(10):1325-1337.
 - [55] T. Yamauchi, M. Takamatsu, and S. Imahori. Optimizing train stopping patterns for congestion management. [J]. OASlcs- ATMOS,2017,13,1-15.
 - [56] Hwan Park, Bum & Kim, Jang- Wook. Finding Train Frequencies and Halting Patterns Using Optimization Models: A Focus on the Line Plan for High-Speed Trains. Journal of the Korean Society for Railway. 2017,20. 529-538.
 - [57] Cominetti.R.C.J, Common-Lines and Passenger Assignment in Congested Transit Networks[J].2001,3(35):250-267.
 - [58] HoH W W S C L. Combined distribution and assignment model for a continuum traffic equilibrium problem with multiple user classes[J]. Transportation Research Part B Methodological,2006,8(40):633-650.
 - [59] Lin W H X W. Stochastic user equilibrium assignment in schedule- based transit networks with capacity constraints [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2012(3).
 - [60] Liu J Z X. Capacitated transit service network design with boundedly rational agents[J].Transportation Research Part B Methodological, 2016(93):225-250.
 - [61] Pi X, Ma W, Qian Z S. A general formulation for multi -modal dynamic traffic assignment considering multi-class vehicles, public transit and parking[J]. Transportation Research Part c, 2019,4(104).
 - [62] 李晏良,刘兰华,李志强.基于地理信息系统的高速铁路噪声地图绘制技术[J].中国铁道科学,2022,43(01):182-188.
 - [63] Cacchiani, V., Qi, J., Yang, L., Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty [J]. Transp. Res. B, 2020, 136, 1–29.
 - [64] Dong, X., Li, D., Yin, Y., Ding, S., Cao, Z., Integrated optimization of train stop planning and timetabling for commuter railways with an extended adaptive large neighborhood search metaheuristic approach [J]. Transp. Res. C, 2020, 117, 102681.
 - [65] Jianguo Qi, Valentina Cacchiani , Lixing Yang, An Integer Linear Programming model for integrated train stop planning and timetabling with time-dependent passenger demand [J]. Computers & Operations Research, 2021, 136, 105484

- [66] Meng, L., Zhou, X., An integrated train service plan optimization model with variable demand: A team-based scheduling approach with dual cost information in a layered network [J]. *Transp. Res. B*, 2019, 125, 1–28.
- [67] 陈琪,曾翠峰,郭莹,罗钦.基于换乘重要度的轨道交通网络运营计划协调优化[J].*华东交通大学学报*,2019,36(1):79-86.
- [68] Parbo, J., Nielsen, O.A., Prato, C.G., Reducing passengers' travel time by optimising stopping patterns in a large-scale network: A case-study in the Copenhagen Region [J]. *Transp. Res. A*, 2018, 113, 197–212.
- [69] Yang, S., Liao, F., Wu, J., Timmermans, H.J., Sun, H., Gao, Z., A bi-objective timetable optimization model incorporating energy allocation and passenger assignment in an energy-regenerative metro system [J]. *Transp. Res. B*, 2020, 133, 85–113.
- [70] 张诚,刘敏,严利鑫.高速铁路对我国区域经济影响的研究[J].*华东交通大学学报*,2020,37(2):64-71.
- [71] 范士娟,何姗,徐玉萍,陆宇.高速铁路对江西省虹吸效应的影响分析[J].*华东交通大学学报*,2021,38(1):67-72.

个人简历 在读期间发表的学术论文

个人简历:

任逸飞, 男, 1997 年 9 月生。

2019 年 7 月毕业于华东交通大学交通运输专业, 获学士学位。

2019 年 9 月入华东交通大学读工学硕士。

已发表论文:

[1] 查伟雄, 任逸飞, 李剑, 严利鑫. 基于理想点法的高速铁路列车停站方案优化[J/OL]. 北京交通大学学报. (CSCD, 导师第一作者, 本人第二作者)

参与课题:

- [1] 南昌市 2019 年都市公交专项调查, 主要参与人员
- [2] 南昌市洪都大道建筑立面提升改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [3] 南昌市象山路、叠山路改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [4] 南昌市海关桥及周边道路改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [5] 南昌市第二批雨污水管改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [6] 南昌市桃花南路改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [7] 南昌市沿江中北大道改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [8] 南昌市北京路口改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [9] 南昌市洪都大道管线迁移改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [10] 余干县智慧交通建设项目, 主要参与人员
- [11] 九龙湖过江大桥工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [12] 南昌市轨道交通 1 号线东延工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [13] S49 枫生快速路提升改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [14] 南昌市玉屏东大街改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员
- [15] 南昌市孺子路改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

致谢

我在七年前踏入华东交通大学，开始交通运输领域的学习，经过努力，在三年前考研本校的学硕研究生，继续交通运输领域的学习，这三年我在交通运输与经济研究所这一省级实验室进行学习办公，三年的时间过的很快，还有些不舍。借毕业论文完成的机会，我要感谢很多对我关心和帮助的人。

首先，感谢我的导师查伟雄老师。我在本科时期就上过查老师的运筹学课程，他深入浅出的讲解让我遨游在运筹学的海洋中，也让我下定决心，要努力学习，我考研上岸后，在硕士选导师的阶段毅然决然的选择了查老师，查老师这三年对我的帮助是巨大的，不管是在学习上、工作上还是为人处事方面。在我撰写小论文的时候，查老师从选题、撰写以及后面反反复复的修改都给了我很大的帮助，在我论文被退修的时候，查老师鼓励我不要灰心丧气，帮我逐字逐句的斟酌推敲。本文的撰写工作也有查老师很大的心血。在此，我衷心的感谢查老师为我的付出。祝愿查老师在以后的生活工作中处处顺心。

我要感谢同一个实验室的老师，他们既是我的师兄师姐，也是我的老师，曾在本科的时候教过我。李老师作为我的大师兄，风趣幽默且专业水平特别扎实，平时我碰到不懂的问题都会咨询他，他也会热情的跟我讲解，我跟着他学习了很多编程知识，本篇论文的算法设计过程中遇到的问题也是在他的指导下解决的。易老师在我眼中是年轻有为的美女教师，她在我研一的选题的时候给我许多参考意见，对于我走的一些弯路，她也帮我及时的指正。在小论文投稿之前，她尽心尽力帮我反复检查。

我要感谢同一个实验室的奚宽响师兄、冯涛师兄、郑开娣师姐、段凌林师姐、张子悦师姐、蔡其燕师姐，他们的专业能力都非常强，在我刚入学的时候，给予了我很大的帮助，在我选题时给我很多作为过来人的参考意见；感谢谢贤亮师弟、程皓琨师弟、舒伟成师弟、王安东师弟、周佳宇师妹、杨思思师妹、高金哲师妹、颜雪柯师妹，他们为研究所带来了活力，在跟他们传授专业知识时，我明白了实验室的“传承”，也让我的专业知识更加扎实；感谢我的同门王宇晴、季华伟，我们一起参加研究生建模比赛，战无不胜，攻无不克，在学习工作生活中互相帮助，一起成长；感谢我的室友陈涛、聂欣、阮开国，他们乐观开朗，让我在寝室的生活丰富多彩。

最后，我要感谢我的父母，感谢他们从小对我培养，为我培养了很多兴趣爱好，也让我变得多才多艺，也感谢他们给我丰富的物质生活，满足了我很多的需要。我要感谢我的爷爷奶奶外公外婆对我的关心，虽然他们不懂专业知识，但愿意听我跟他们讲交通领域新的发展。我要感谢我的女朋友在我求学路上的悉心照料，也感谢她在我深夜还在伏案学习的时候陪我一起熬夜。以后我要加倍回报他们。

感谢为我加油鼓劲的所有人，愿大家永远幸福。