

分类号_____

密级_____

UDC_____

编号_____

華東交通大學

全日制专业硕士学位论文

**列车运行调整与到发线运用协同优化模型及
算法**

学位申请人： 王宇晴

学科领域： 交通运输工程

校内导师： 查伟雄 教授

校外导师： 贺斯进 教授级高工

答辩日期： 2022. 05. 28

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	交通运输工程	学号	2019138085222014
论文题目	列车运行调整与到发线运用协同优化模型及算法				

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 李晨曦 日期 2022.05.28

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 李晨曦 导师签名 李伟雄 日期 2022.05.28

列车运行调整与到发线运用协同优化模型及算法

摘要

目前我国铁路运输业已经在全国交通运输行业中占据了十分重要的份额，对铁路运输组织方面的研究也在如火如荼的进行。面对不断壮大与迅猛发展的铁路运输业务，合理配置现有的铁路资源，充分发挥铁路行车调度指挥能力成为了研究的热点。列车运行调整与到发线运用都是铁路行车调度指挥工作中的重点，列车运行调整的主要是对列车的到发时刻、列车占用区间的次序以及列车占用区间的时长进行调整；到发线运用则是列车在车站具体占用进路和到发线的固定方案，同时列车运行调整与到发线运用也是有着相辅相成的关系。仅针对列车运行调整的优化问题，或者仅针对到发线运用问题国内外学者已有了一定的研究成果，但是两者同时考虑去进行优化的研究还是较少。因此，对列车运行调整与到发线运用的协同优化问题进行研究，具有一定的实际运用价值。

本文针对列车运行调整与到发线协同优化问题，借助运筹学理论，建立多目标协同优化模型，设计适用于模型的求解算法，以获得优化求解后的列车运行调整方案和到发线运用方案，协助铁路工作者进行决策。主要的研究成果如下：

首先，对国内外列车运行调整、到发线运用两个方面的研究内容进行了梳理，接着对列车运行调整与到发线运用的相关理论进行阐述分析。在列车运行调整相关理论中对列车运行图、列车晚点的影响因素、晚点的情况，以及运行调整方式、结果评价进行阐述。在到发线运用相关理论中对到发线运用的要素、调整方式、车站作业过程、占用时间标准进行阐述。并对列车运行调整与到发线运用的相关性进行了梳理。

其次，在模型的建立过程中，考虑宏观层面的列车流运行调整优化与微观层面车站的到发线运用优化，以列车的总加权到发晚点时间最少和到发线的占用费用最小为目标，建立了多目标协同优化的整数规划模型，通过模型分析确定运用分层序列法对模型的多目标问题进行处理，以便求解。结合基本鸽群优化算法的特点，运用 Logistic 映射、自适应因子、柯西分布、高斯分布，对算法进行改进。设计了适用于求解本文多目标模型的分层序列-鸽群优化算法进行求解。

最后，根据所选算例，并假设多种晚点情况，求解得到了经过模型算法优化调整后的列车运行时刻表和到发线运用变更情况，为调度人员的决策提供借鉴，验证了本文列车运行调整与到发线协同优化模型及算法的有效性和可行性。

关键词：铁路运输，列车运行调整，到发线运用，协同优化模型，鸽群优化算法

Collaborative optimization model and algorithm of train operation adjustment and arrival-departure track using

ABSTRACT

At present, the of China's railway transportation industry has occupied a very important share in the national transportation industry, and the research on railway transportation organization is also in full swing. Facing the growing and rapid development of railway transportation business, it has become a research hotspot to reasonably allocate the existing railway resources and give full play to the railway traffic dispatching and command ability. The adjustment of train operation and the application of arrival departure track are the key points of railway operation dispatching and command. The main objectives of train operation adjustment are the sequence of train occupied sections and the duration of train occupied sections. At the same time, it is necessary to adjust the arrival departure time of trains, etc; The use of arrival departure track is the fixed scheme for the train to occupy the route and arrival departure track at the station. At the same time, the train operation adjustment and the use of arrival departure track also complement each other. Scholars at home and abroad have made some research achievements only for the optimization of train operation adjustment or the operation of arrival departure track, but there are still few studies on the optimization of both at the same time. Therefore, it is of practical significance to study the collaborative optimization of train operation adjustment and arrival departure track operation.

Aiming at the problem of coordinated optimization of train operation adjustment and arrival departure track, with the help of operational research theory, this paper establishes a multi-objective optimization model and designs an algorithm to obtain the optimized train operation adjustment scheme and the application scheme of arrival departure track, so as to assist railway workers in decision-making. The main research results are as follows:

Firstly, it combs the research contents of train operation adjustment and arrival departure track application at home and abroad, and then expounds and analyzes the relevant theories of train operation adjustment and arrival departure track application. In the relevant theories of train operation adjustment, the train diagram, the influencing factors of train delay, the situation of delay, the operation adjustment mode and the result evaluation are described. In the relevant theories of the application of arrival departure track, the elements of the application of arrival departure track, adjustment mode, station operation process and occupation time standard are described. The correlation between train operation adjustment and the operation of arrival departure track is sorted out.

Secondly, in the process of establishing the model, considering the adjustment and optimization of train flow at the macro level and the utilization optimization of arrival departure track at the micro level, taking the minimum total weighted arrival delay time of the train and

the minimum occupation cost of the arrival departure track as the objectives, an integer programming model of multi-objective collaborative optimization is established. Through model analysis, it is determined to use the hierarchical sequence method to deal with the multi-objective problem of the model, so as to solve it. Combined with the characteristics of the basic pigeon colony optimization algorithm, the algorithm is improved by using logistic mapping, adaptive factor, Cauchy distribution and Gaussian distribution. A hierarchical sequence pigeon swarm optimization algorithm is designed to solve the multi-objective model in this paper.

Finally, according to the selected example and assuming a variety of delay conditions, the train operation schedule and the change of arrival departure track operation after the optimization and adjustment of the model algorithm are obtained, which provides a reference for the decision-making of the dispatcher, and verifies the effectiveness and feasibility of the collaborative optimization model and algorithm of train operation adjustment and arrival departure track in this paper.

Key Words: Railway transportation, train operation adjustment, arrival-departure track using, Collaborative optimization model, Pigeon-inspired Optimization algorithm

目录

主要符号说明	I
第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.2.1 列车运行调整研究现状.....	3
1.2.2 到发线运用研究现状.....	5
1.2.3 研究现状综述.....	6
1.3 主要研究内容及论文框架.....	7
1.3.1 主要研究内容.....	7
1.3.2 论文框架.....	8
1.4 本章小结.....	10
第二章 列车运行调整与到发线运用的相关理论	11
2.1 列车运行调整相关理论.....	11
2.1.1 列车运行图的概念与基本要素.....	11
2.1.2 列车晚点的影响因素.....	14
2.1.3 列车晚点情况分析.....	15
2.1.4 列车运行调整方式.....	17
2.1.5 列车运行调整结果评价.....	18
2.2 到发线运用相关理论.....	21
2.2.1 到发线运用的相关要素.....	21
2.2.2 到发线运用的调整方式.....	21
2.2.3 车站作业过程分析.....	22
2.2.4 咽喉区与到发线占用时间标准.....	24
2.3 列车运行调整与到发线运用的相关性分析.....	26
2.4 本章小结.....	27
第三章 列车运行调整与到发线运用协同优化建模分析	28
3.1 问题描述.....	28
3.1.1 列车运行调整描述.....	28
3.1.2 到发线运用调整描述.....	28
3.2 模型假设.....	29
3.3 模型的建立.....	29
3.3.1 列车运行调整约束.....	29

3.3.2	到发线运用约束.....	30
3.3.3	目标函数.....	31
3.4	模型分析.....	32
3.4.1	多目标模型的整合方法.....	32
3.4.2	目标函数的转化.....	34
3.5	本章小结.....	35
第四章	算法设计.....	36
4.1	群体智能算法.....	36
4.2	基本鸽群优化算法.....	36
4.2.1	鸽群优化算法概述.....	37
4.2.2	鸽群优化算法步骤.....	39
4.3	基于分层序列-改进鸽群优化算法的模型求解.....	41
4.3.1	鸽群优化算法的改进.....	41
4.3.2	改进的鸽群优化算法步骤.....	47
4.4	本章小结.....	50
第五章	算例分析.....	51
5.1	算例情况.....	51
5.1.1	算例背景.....	51
5.1.2	算例数据.....	52
5.2	算法参数设置.....	54
5.3	不同晚点情况的调整优化结果.....	54
5.3.1	晚点情况一的优化结果.....	55
5.3.2	晚点情况二的优化结果.....	56
5.3.3	晚点情况三的优化结果.....	57
5.3.4	晚点情况四的优化结果.....	58
5.3.5	到发线运用调整结果.....	60
5.4	本章小结.....	62
第六章	结论与展望.....	63
6.1	主要工作内容与结论.....	63
6.2	论文创新点.....	64
6.3	研究展望.....	64
参考文献	65
个人简历	在读期间发表的学术论文.....	69
致谢	70

主要符号说明

I	进入运行调整时间段的列车集合, $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m, \dots, i_M\}$
J	列车运行调整区段内, 车站集合, $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n, \dots, j_N\}$
JC_{j_n}	表示车站 j_n 接车进路集合, $JC_{j_n} = \{w_1, w_2, \dots, w_{g_n}, \dots\}$
g_n	车站 j_n 对应的接车进路数量
FC_{j_n}	表示车站 j_n 发车进路集合, $FC_{j_n} = \{r_1, r_2, \dots, r_{h_n}, \dots\}$
h_n	车站 j_n 对应的发车进路数量
k_n	表示车站 j_n 的到发线数量
K_{j_n}	表示车站 j_n 的到发线集合, $K_{j_n} = \{l_1, l_2, \dots, l_{k_n}\}$
$T_{i_m j_n}^{d_0}$	列车运行调整前的图定到达时分
$T_{i_m j_n}^{c_0}$	列车运行调整前的图定出发时分
$T_{i_m j_n}^d$	列车运行调整后的实际到达时分
$T_{i_m j_n}^c$	列车运行调整后的实际出发时分
$x_{i_m j_n l}$	列车 i_m 在车站 j_n 使用到发线 l 的 0-1 决策变量
$y_{i_m j_n l}^w$	列车 i_m 在车站 j_n , 与到发线 l 衔接的接车进路 w 的 0-1 决策变量
$y_{i_m j_n l}^r$	列车 i_m 在车站 j_n , 与到发线 l 衔接的发车进路 r 的 0-1 决策变量
$\eta(i_m)$	列车的优先等级, 值越大表示列车优先等级越高
$\varphi(i_m)$	列车优先等级所对应的权重
$T_{i_m, j_n - j_{n+1}}$	不同等级列车相邻两站之间的最小运行时分
$T_{i_m j_n}$	列车的列车 i_m 在车站 j_n 最小作业时分
$T_{j_n - j_n}$	相邻两列车的达到通过同一车站的最小间隔时间
T_d	列车在车站的最小到达时间间隔
T_c	列车在车站的最小出发时间间隔
t_q	列车的启动附加时分
t_t	列车的停车附加时分
$\beta_{i_m j_n}$	列车 i_m 通过车站 j_n 的作业类型, 停站或通过作业的 0-1 决策变量

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

我国铁路运输总量逐年上涨,由图 1-1 可见,铁路旅客发送量和周转量从 2014 年至 2019 年都是逐年递增的,图 1-2 也显示,2008 年至 2020 年铁路营运里程呈阶梯式上升。因此,我们要大力地去发展铁路,鼓励个人和企业尽可能的选择运用铁路这种运输方式,减少不必要的公共资源占用。将我国建设成为一个能源节约,环境友善型的社会,加速铁路网的发展,建设完善的铁路网,增强我国经济的可持续发展性。虽然受到疫情影响,在旅客发送量方面,2020 年有较大幅度的缩减。然而,随着铁路行业整体的不断发展和逐步完善,我国的铁路运输环境也与从前有很大的不同。不同之处主要体现在铁路运输网络的成型和运输市场竞争的加剧。运输环境带来的变革导致铁路运营管理部门也面临着日益艰巨的运输组织任务。为了适应这种变化所带来的挑战,铁路运营管理部门则需要运用更为先进的管理技术和管理方法,进一步提升铁路的运输组织效率和运输竞争力。

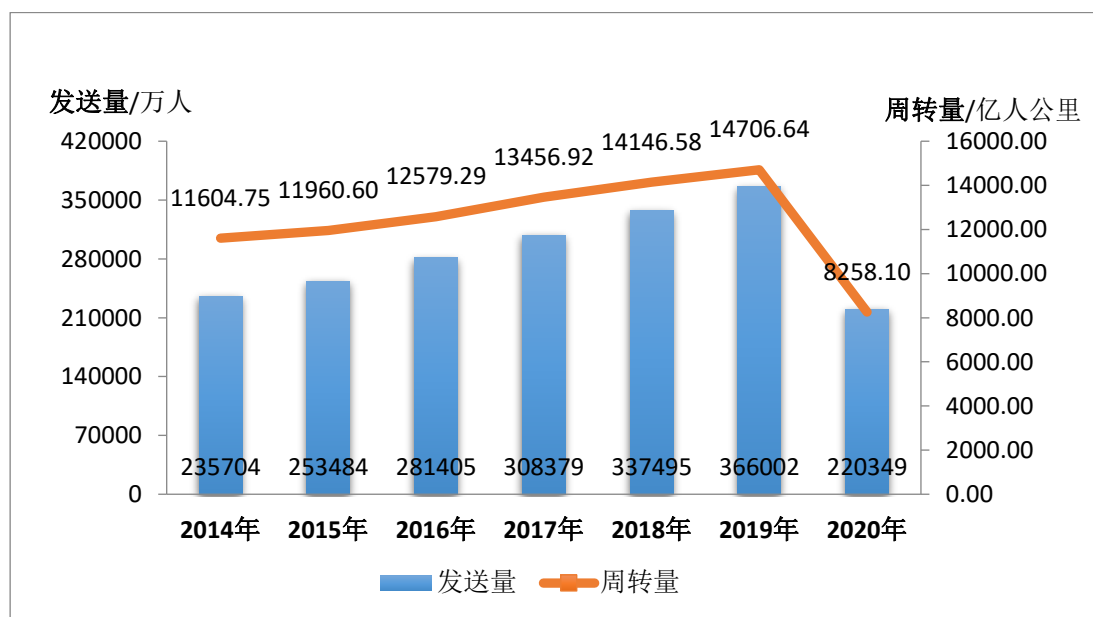


图 1-1 全国铁路旅客的发送量和周转量变化情况

Fig. 1-1 National railway passenger volume and turnover

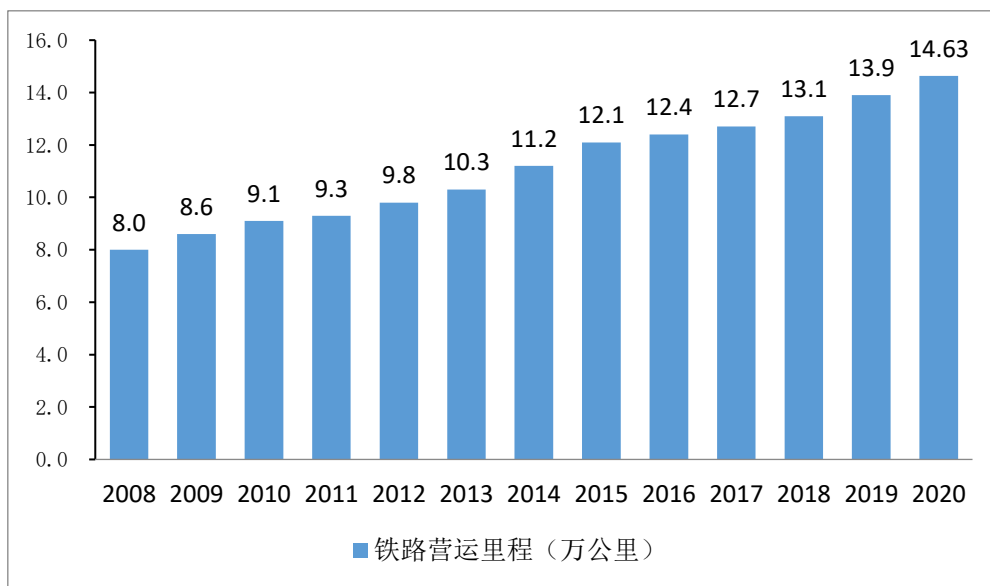


图 1-2 2008-2020 年我国铁路营运里程的变化情况

Fig. 1-2 China's railway operating mileage from 2008 to 2020

目前来看,我国的列车运行调度指挥工作主要以区段为主,铁路的调度工作在主观性方面还是较强,不同水平不同层次的调度人员工作能力和习惯各有不同,在处理突发事件的时候,基本是只对本职管辖区段内的列车制定相关的运行调整计划,在遇到突发紧急情况时,往往没有集中同一的运输组织方式,在理论指导体系上也相对不完善,也导致了运输组织效率难以得到实质性的提升。除此之外,一些突发事件可能会使铁路线路的通过能力和车站内的接发车能力降低,主要就是表现在到发线运用上,现今即使列车运行调整系统已有很多种,但是大部分的系统中都缺乏将列车运行调整和到发线运用进行协同考虑,并且同时进行调整。在列车运行调整的过程中,如遇到需要调整到发线的情况,具体需要如何调整,大部分都是依靠调度人员的主观和经验判断,缺乏系统指导。从系统整体角度考虑,这样的方式在效率上是很难得到保证的,如果到发线运用调整不当,很可能导致列车运行效率进一步降低。

综上,研究遇到突发事件后,列车运行调整与到发线运用的协同优化问题,在提升铁路运输组织效率方面具有十分重要的意义。

1.2 研究现状

国内外对列车运行调整与到发线运用协同优化问题的相关研究不多,但是对列车运行调整与到发线运用这两个问题单方面的研究非常丰富,研究成果主要集中与模型的改进及算法的应用等方面。所以单考虑列车运行调整和单方面到发线运用的研究成果及研究理论都较为完善。根据列车运行调整研究方法的不同,将相关文献按照运筹优化方法、智能计算方法、仿真方法进行分类。

1.2.1 列车运行调整研究现状

B.Szpigel^[1]于 1972 年率先提出了“最优列车调度问题”，采用运筹学中分支定界的方法来解决该问题。至此之后，国内外学者对于列车运行调整的研究成果也逐渐丰富起来，大多数研究成果都集中于模型的改进与算法的创新应用方面。本文将研究文献按运筹优化方法、智能计算方法、仿真方法进行分类。

(1) 运筹优化方法

在 B.Szpigel 的研究出现以后，国外学者 Sauder 等^[2]设计了一种全局优化算法，来求解单线铁路的列车运行调整模型，并利用分支定界法求出了列车的交会和越行方案。Araya 等^[3]提出了一种在干扰条件下，能够进行优化调整的实时行车指挥方法，并运用这种方法求解列车运行调整的混合整数规划模型，得到了模型的次优解，接着以次优解为上界，继续求解得到了优化解。Cury 等^[4]为轨道公司设计了一种列车时刻表系统，根据列车运行和乘客走行建立优化模型，利用拉格朗日松弛算法将问题分解成多个子问题，并依据层级对子问题进行求解。

国内学者在使用运筹优化方法研究列车运行调整问题上，查伟雄等^[5]以复线铁路为研究对象，以列车的准点率和列车的速度为目标函数，建立了列车运行调整的线性规划模型，重点对需要进行运行调整的列车，其调整前后的相互关系和位置进行分析。史峰等^[6]基于列车运行图具有周期性特点，把模型拆解为阶段性模型，运用时间循环迭代的方式进行模型的求解。章优仕等^[7]建立基于满意优化理论的优化模型，并基于该模型设计梯度搜索算法进行求解。孟令云等^[8]建立不完全连续多阶段决策列车运行调整模型，根据实例设计分支定界算法求解。曾壹等^[9]针对现阶段列车运行计划调整算法在计算效率方面所遇到的瓶颈，设计了一种基于约束规划方法的运行调整优化模型，将原问题通过有向图的形式进行表达，构建基于有向图的约束满足问题。高如虎等^[10]通过构建 Time-Station-Track 三维的时空网络拓扑图，对列车运行调整问题进行表达，将原问题转化为求解单目标最小费用问题，并用拉格朗日松弛算法进行求解。龙思慧等^[11]以列车的总延误时间最小与列车运行能耗最低为优化目标，建立了两个目标的一体化优化模型，并求得了问题的帕累托解集。徐培娟等^[12]基于替代图理论，兼顾车站进路调整约束，建立列车运行调整的混合整数线性优化模型，设计两阶段近似求解算法进行计算。

通过建立单目标或者多目标的优化模型，来解决列车运行调整问题是比较普遍且适用的方法，但是由于模型具有一定的复杂性，往往需要在模型的求解过程中利用合适的智能计算的方法。在实际生产调度过程中，列车运行调整的实时性也十分重要，利用智能算法同时也能够大大缩短求解模型的时长。因此，对研究人员的算法编程能力也有一定的要求。

(2) 智能计算方法

随着信息技术的发展，更多的智能计算方法引入到列车运行调整领域中。这种研究方法的比较显著的特点就是更加贴近于调度人员的实时决策过程，同时能够短时间快速

的得到满意的结果。Xiaoming Xu 等^[13]考虑可行速度约束建立优化模型, 为了得到模型的最优解, 设计了一种基于 ITAS 的改进遗传算法 (GA-ITAS) 对模型进行求解。Yusin Lee 等^[14]通过建立线性规划模型, 在列车运行时段内给予有效的调整和缓冲时间来降低列车的延误, 最后运用启发式算法来进行求解。Jin Liu 等^[15]通过建立一种与列车运行调整对等的系统, 用来求解列车运行调整问题, 针对系统的各个区域分别采用遗传算法进行求解, 最后通过局部搜索算法得到问题的可行解。段少楠等^[16]基于群体智能算法中具有代表性的萤火虫算法为主体, 设计了一种离散萤火虫算法 (DFA) 对列车运行调整问题进行求解。牛晋财等^[17]以列车的加权总到发晚点时间最少为目标, 建立了运行调整模型, 并运用人工鱼群算法进行求解, 同时给出了比较详细的计算步骤。李晓娟等^[18]基于高速铁路列车运行的特点, 以所有列车在车站的总延误时间最小为目标, 建立优化调整模型, 并设计了基于分阶段多叉树的优化调整算法进行求解。冉江亮^[19]以所有列车的总延误时间最小为目标, 建立了突发事件条件下的列车运行调整优化模型, 采用基于动态变化惯性权重的改进粒子群算法求解模型。查伟雄、张子悦等^[20]基于客货混行条件, 建立了运行调整的混合整数非线性规划模型, 并采用自适应柯西变异人工蜂群算法对模型进行求解, 最后以云南的盘西铁路为例, 对模型和算法的可行性进行验证。户佐安等^[21]结合列车实际运行情况设立约束条件, 以旅客的总旅行时间最少为目标, 并采用一种嵌套式的遗传算法对模型进行求解。

运用智能计算的方法来求解列车运行调整模型, 固然有着一些优势, 但是在实际生产调度过程中, 仿真方法的分析借鉴作用也尤为重要。

(3) 仿真方法

在列车运行调整问题中, 仿真方法的本质是通过离散事件的仿真模型来模拟列车的运行过程, 在仿真的过程中运用不同的策略方法对列车的运行计划进行调整。Egidio Ouaglietta 等^[22]建立了一种列车的仿真运行模型, 模型通过追踪虚拟耦合条件下列车的运行状态并进行运行调整, 并运用英国西南某线的实时数据进行了分析, 证明了仿真模型的有效性。Masoud Shakibayifar 等^[23]建立了一种基于多目标仿真的优化模型, 分别在严重和轻微干扰条件下, 对列车进行调整, 设计了一种适用于求解多目标模型的启发式算法求解, 并且生成了可行解的解集。Xiaoming Xu 等^[24]将列车在时空中的状态分为车站停留状态、车站候车状态以及区间行驶状态, 设计了一种基于迭代离散事件仿真的列车运行调度方法进行仿真分析, 并采用具体数据仿真, 验证了可行性。

朱子轩等^[25]以单线铁路网为基础, 建立优化模型, 采用 Anylogic 软件进行实际运行数据的仿真分析。张正坤等^[26]针对不同等级列车可能发生对冲, 造成延误, 为提高仿真系统的全局搜索能力, 设计了一种基于有限和分层随机策略的离散列车运行仿真系统, 并通过实际算例进行验证。吉祥雨^[27]针对城市轨道交通列车运行调整的实际情况, 考虑了基于客流量的全自动运行系统列车运行调整方法进行研究及仿真分析。张艺琳^[28]以深圳地铁 1 号线信号系统故障为案例, 对信号故障场景下的列车运行过程和行车调整方案

进行仿真。张永光^[29]针对运行优化算法求解的运行方案无法直接应用于真车进行测试验证的需求,利用虚拟现实技术,设计了验证优化算法的虚拟仿真软件。李和璧^[30]梳理了列车群行车仿真实论方法,以我国高速铁路运输组织特点为基础,建立了高速铁路列车群运行仿真系统技术的理论框架。谭畅^[31]构建了基于干扰和停滞状态的列车运行过程制动空间模型,并运用 CRH380AL 型列车的实际运行数据进行仿真分析。

1.2.2 到发线运用研究现状

到发线运用主要包括:列车在站内的技术作业、到发线的占用、调车机车作业、车底的取送、接发车进路等。到发线运用问题依据的实际情况来看,也属于 NP-Hard 问题,求解难度随着车站的复杂程度,而逐渐提升。国内外的学者针对到发线运用优化问题的研究方面,也较为丰富。大多是根据车站的实际问题和晚点情况,建立数学规划模型,再利用合适的求解算法对目标进行求解。

Carey M 等^[32]运用禁忌搜索算法来求解列车在车站的最优通过径路。Partha Chakroborty^[33]等综合考虑列车延误、车站股道分配等影响,将列车进站后的股道分配进行优化研究,构建了股道分配的优化模型进行求解分析。Corman F 等^[34]把到发线运用的优化问题进行拆分,建立了有三个目标的到发线运用多目标优化模型,并使用遗传算法进行求解。Baoshan WANG 等^[35]综合考量车站内部的拓扑结构和站内运行规则,以到发线的利用率最高为目标函数,建立优化模型,并运用遗传算法求解。RuiJun Qiao 等^[36]以占用股道的列车权重之和最大和利用率最均衡为目标,建立了到发线利用率的多目标优化模型,以北京南站的站场的实例数据进行计算并验证。

赵茜茜等^[37]通过对车站网络的重新定义,建立了到发线运用的 0-1 整数规划模型,运用改进的模拟退火算法求解模型。刘伟等^[38]运用模拟退火算法求解,以股道总占用时间最小与股道的均衡性为目标函数的到发线运用多目标优化模型。刘杰等^[39]以车站作业计划的稳定性最优和接发车进路条件最优为优化目标,构建了到发线运用与车站咽喉区运用的多目标优化模型,运用改进的 NSGA-II 算法进行求解。彭其渊等^[40-41]从微观角度,将到发线运用过程的时空资源占用离散化,以列车运行晚点最少和车站作业秩序影响最小化为目标函数,建立了混合整数线性规划模型,并设计了适用于求解模型的遗传模拟退火算法,进行具体算例的求解。李涛等^[42]基于列车到发时刻波动,以列车占用到发线的总时间最小和到发线运用的均衡性最佳为目标函数,建立了到发线运用优化模型,并设计改进遗传算法求解。任禹谋等^[43-45]通过滚动时域的调度策略,以列车晚点的总时长最小为目标,建立了到发线运用动态调整的整数模型,并运用遗传算法求解。综合考虑到发线的分配优化方案,以到发线均衡性为优化目标,构建了车站咽喉区和到发线整体运用的多目标优化模型,运用遗传禁忌混合算法求解。引入约束支配原则,以到发线利用均衡、计划鲁棒性强和客运服务质量为优化目标,构建到发线运用的多目标优化模型,运用改进的 NSGA-II 算法进行求解。郎越^[46]以提高车站作业的鲁棒性和到发线资源占用的均衡性为目标的整体优化模型,运用基于斜率优化的改进型 NSGA-II 算法求

解。

1.2.3 研究现状综述

目前,国内外学者单针对列车运行调整优化问题,或者单针对到发线运用优化问题上,均进行了丰富的研究与探索,并且也取得了很多丰硕的成果。在列车运行调整的研究上,大多学者将列车的总加权延误时间作为问题的目标函数,以区间运行时间、停站作业时间、列车间隔时间等作为约束进行建模优化,并运用实际算例进行分析验证。从目前的研究现状来看,列车运行调整与到发线运用的优化问题仍然还有一些不足,且有待进一步深入研究。具体有以下几个方面:国内学者对列车运行调整优化的研究大都集中在宏观的列车流方面,针对车站微观层面的研究较少;国外学者大多针对旅客列车的路网层面,考虑系统整体的调度问题,均是采用国外铁路的实例进行求解并验证有效性。通过对国内外文献的对比可以发现,国外铁路的路网结构、规模以及运输组织模式,与国内铁路的实际情况有一定差距。在算法研究方面,学者们则根据解空间的范围分别设计了与问题相适应的算法,并给出算法步骤。部分学者直接运用求导的方式得到最优值,部分学者则运用分支定界算法求解建立的整数规划模型。但随着解空间的扩大,模型也越来越复杂,运用传统的方法求解计算过程所消耗的时间太长,并且效率也不高。因此,大量的研究运用了不同类型的启发式算法进行求解分析。

在到发线运用的研究上,大多数学者对于求解目标描述都不太相同,有列车站内的总走行时间最小、车站内的总走行距离最短、到发线使用的均衡性、到发线占用的加权费用等,在求解算法上前期的一些研究都运用的一些数学规划方法进行求解,而近期研究较多的是运用启发式算法对到发线运用的相关问题进行求解。从目前的研究现状中,可以发现大多数学者在建模过程中,约束和目标都考虑的比较全面。但在考虑到发线运用方面,大多只考虑了各站到发线的数量。在发生列车大面积的延误情况下,晚点列车占用到发线大多是依照调度人员的主观意识,所以在运输效率方面难以保证。在研究列车运行调整问题的同时,综合考虑到发线运用的协同优化问题非常有必要。

综上所述,依然可以继续深入研究的方面还有:

- 1、国内外学者在针对列车运行调整问题进行研究的过程中,大多集中于列车流层面的宏观列车运行调整研究,还需进一步综合考虑车站微观层面,车站站内到发线运用的协同优化问题;

- 2、在模型的建立上,大部分学者考虑调整列车时刻表与开行次序,鲜有将列车运行调整与到发线运用相结合进行研究;

- 3、在算法的设计上,多采用运筹优化方法、启发式算法等,鲜有运用改进的群体智能算法进行求解。

通过总结以上有待进一步深入研究的方面,为本文进一步的研究提供了思路和重点攻克的方向。

1.3 主要研究内容及论文框架

1.3.1 主要研究内容

本文首先对列车运行调整与到发线运用的相关理论进行阐述。在列车运行调整的相关理论中,对列车运行图的概念与基本要素、列车晚点的影响因素、列车晚点的情况、列车运行调整的方式以及列车运行调整的结果评价进行了分析。在到发线运用相关理论中,对到发线运用的要素、调整方式、车站作业过程、占用时间标准进行了分析。最后,对列车运行调整与到发线运用的相关性进行了梳理。建模过程中,综合考虑宏观层面的列车流运行调整与微观层面车站的到发线运用调整,以列车的总到发晚点时间最少和到发线的占用费用最小为目标函数,建立了列车运行调整与到发线运用多目标协同优化的整数规划模型,并设计了适用于求解模型的分层序列-鸽群优化算法进行求解,得到突发晚点情况下的列车运行调整计划时刻表和到发线运用变更情况,全文的重点在于模型的构建与相关算法的实现求解。

具体的研究内容如下:

第一,绪论。首先对本文的研究背景及意义进行概述,再从列车运行调整和到发线运用两个方面,总结分析了国内外研究现状,最后引出本文的主要研究内容和技术路线,构建全文的主题框架。

第二,列车运行调整与到发线运用的相关理论。对列车运行图的概念与基本要素进行概述,分析列车在运行调整问题中的晚点影响因素、晚点情况,以及运行调整的方式和结果评价;对到发线运用的相关要素、到发线运用的调整方式、车站的作业过程、咽喉区与到发线占用时间标准进行阐述。最后梳理列车运行调整与到发线运用两者的相关性。

第三,列车运行调整与到发线运用协同优化建模分析。以总到发晚点时间最少和到发线占用费用最小为优化目标,考虑列车运行调整中的最小到发时间间隔、区间最小运行时分、最小停站时间等约束;考虑到发线运用中的接发车唯一性、到发线选择唯一性、到发线被占用约束等约束。建立列车运行调整与到发线运用的协同优化模型,对模型特点进行分析,结合多目标规划问题的求解特性,提出用分层序列法的思想对模型进行求解。

第四,算法设计。以鸽群优化算法为基础,结合算法特点运用 Logistic 映射、自适应因子、柯西分布、高斯分布,对算法进行改进。根据所建模型的特点,设计了一种适用于求解本文列车运行调整与到发线运用协同优化模型的分层序列-鸽群优化算法,对模型进行求解。

第五,算例分析。以郑西高铁线路的一段为例,假设了四种晚点情况,根据所建模型,运用设计的算法进行求解,得到了四种晚点情况下优化调整后的列车运行时刻表和到发线运用的变更情况,为铁路列车的临时调度情况提供了决策的借鉴,具有一定的实际价值。

第六，总结与展望。对全文的主要工作内容与结论进行总结，阐述论文的研究成果、不足之处和创新点，对下一步的研究进行展望。

1.3.2 论文框架

本文首先综述了列车运行调整与到发线运用的主要研究内容与研究成果，并分析这方面可以继续深入研究的地方，阐明本文的研究背景及意义。其次在总结列车运行调整与到发线运用相关理论的基础上，综合考虑列车运行调整和到发线运用的约束条件，建立以列车的总到发晚点时间最少和到发线的占用费用最小的多目标协同优化模型，根据模型的特点，设计了改进的鸽群优化算法对模型求解，以郑西高铁为例进行算例分析，得到了优化调整后的列车运行时刻表和到发线运用变更情况，验证了本文列车运行调整与到发线运用优化模型的可行性，以及分层序列-鸽群优化算法的有效性。本文研究过程的框架图如下所示。

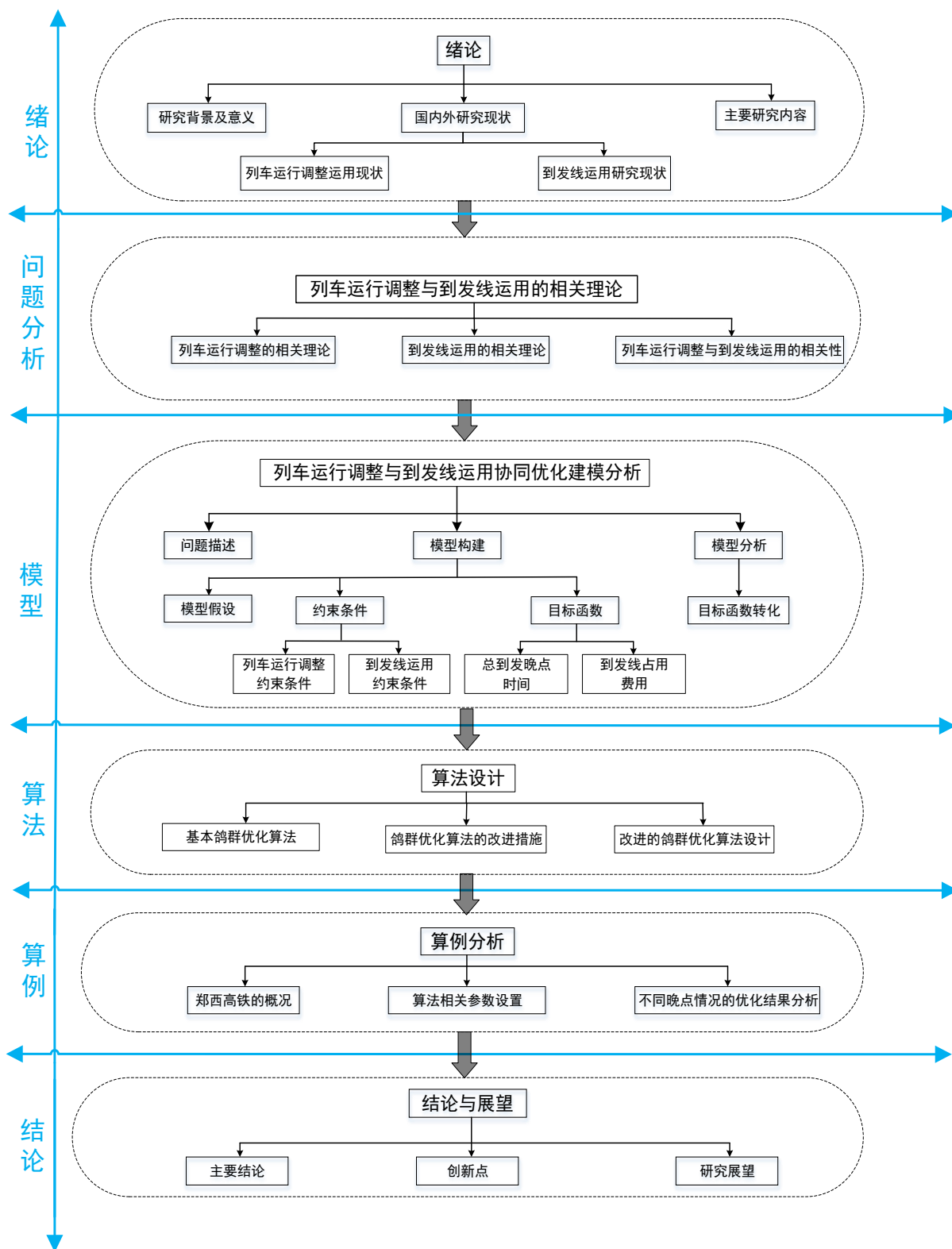


图 1-3 论文框架图
Fig. 1-3 Paper frame diagram

1.4 本章小结

本章是论文的绪论部分。首先具体论述了本文的研究背景和研究意义，接着对现阶段国内外列车运行调整和到发线运用两方面的一些研究文献进行了整理归类，并对目前的研究现状进行了总结分析，最后给出了本文的主要研究内容及全文技术路线。

第二章 列车运行调整与到发线运用的相关理论

2.1 列车运行调整相关理论

2.1.1 列车运行图的概念与基本要素

列车运行图是铁路运营管理部门用来详细描述铁路列车的区间运行,以及列车在车站到发和通过的重要技术文件。该文件对各列列车所占用的区间运行时分、列车在车站的到达时刻、列车在车站的发车时刻、列车在车站的通过时刻、列车在车站的停站时分等都进行了详细的规定。

列车运行图若是按照时间坐标进行分类,可分为三类,分别为二分格运行图、十分格运行图和小时格运行图。按横纵坐标所代表的含义不同,可分为两类:一类是纵坐标表示时间,其具体刻度表达为列车的运行时刻,横坐标表示空间距离;另一类是横坐标为时间,纵坐标为距离。按使用的对象范围进行分类,可将其分为面向铁路内部的列车运行图和面向社会大众的列车运行图。按上下行的列车数量来进行分类,可分为成对和不成对列车运行图。按区间的正线数量进行分类,可分为单线、双线和单双线运行图。按列车的运行速度分类,可分为平行运行图和非平行运行图。对于列车运行图的分类,基本上都是针对其本身的某个特点,但是实际运用中,每张列车运行图均具备以上这些特点。

列车运行图的基本要素,除了区间、车站、线路等固定的设备以外,同时还包括了列车的区间运行时分、列车的启停附加时分、列车的停站时间、车站的间隔时间、追踪列车的间隔时间和维修天窗的时间等。

(1) 列车区间运行时分

列车在某个线路运行区间的前后两个车站之间行驶所消耗的总时间,即为列车区间运行时分。除此之外,还需同时考虑列车在运行区间两个车站之间是否停站的情况,即列车停车或者是不停车直接通过。当列车在前一车站启动出发或在下一站停车,此时列车的区间运行时间则为列车的启停附加时分与区间纯运行时分之和。具体可表示为如下图 2-1 的四种情况。

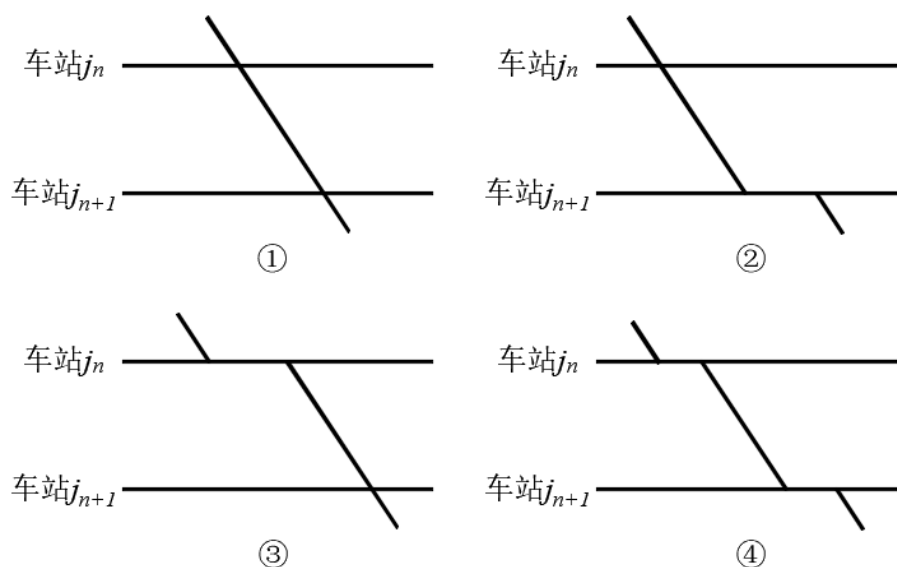


图 2-1 列车区间运行时分

Fig. 2-1 The operation time of trains in segments

(2) 列车在中间站的停站时间

列车在中间站的停站时间主要包含了列车在车站内办理相关作业的时间，比如旅客换乘时间、各项技术作业时间等。该时间标准是综合不同类型列车的性能，以及车站内办理作业的流程和内容，科学制定的。

(3) 车站间隔时间

相邻两列列车在车站办理到发作业或通过作业，所需的最小间隔时间，就是车站间隔时间。车站间隔时间能够有效的保障列车运行过程的安全，并且能够充分利用线路的区间通过能力。车站间隔时间的长短一般取决于行车闭塞类型、车站类型等。具体可分为以下四类。

不同时到达间隔时间：在某单线区段上，两列列车相向行驶在车站交会时，其中一个方向列车到达车站的时间，与另一个方向列车直接通过或停站通过该车站最小的时间间隔。如下图所示。

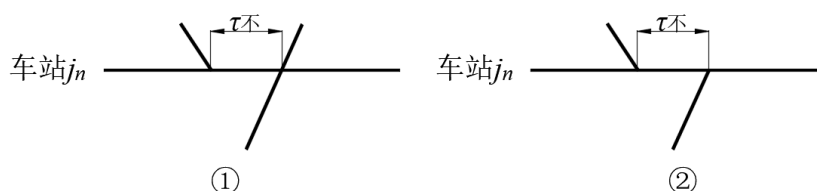


图 2-2 列车到达间隔时间

Fig. 2-2 Arrival interval times of trains

会车间隔时间：在某单线区段上，两对向行驶列车，其中一个方向的列车通过或到达车站的时间与在该车站向同一区间对向发出列车的最小时间间隔。如下图所示。

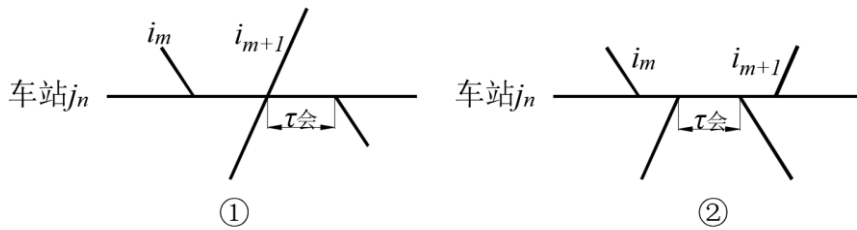


图 2-3 列车会车间隔时间

Fig. 2-3 Passing interval times of trains

列车连发间隔时间：在单线或双线区段上，某一个方向的列车通过或者到达前一车站的时间与相同车站向相同区间出发同方向列车的最小时间间隔。如下图所示。

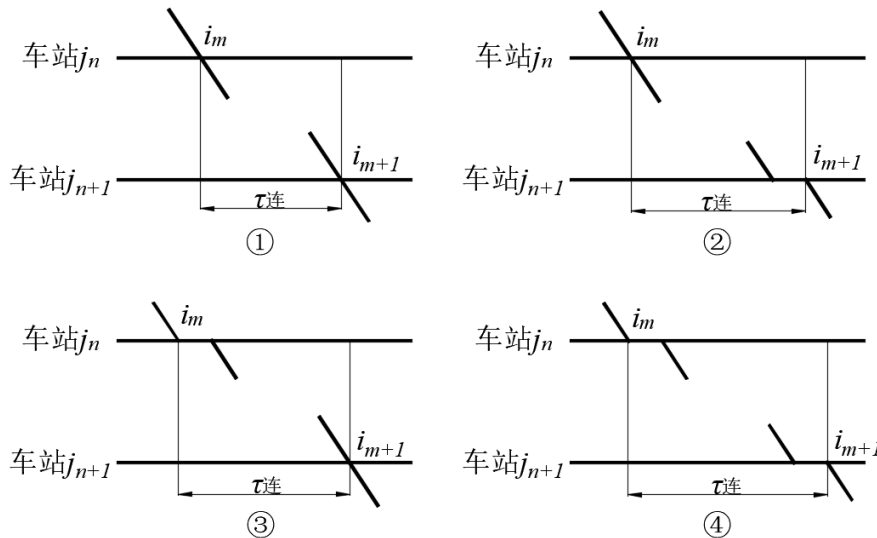


图 2-4 列车连发间隔时间

Fig. 2-4 Departure interval times of trains

图 2-4①表示同一区间，前后两列列车在通过前后两个车站时，不停站通过的连发间隔时间；图 2-4②表示同一区间，前方列车 i_{m+1} 在前方站 j_{n+1} 停站后通过，后方列车 i_m 在后方站 j_n 直接通过；图 2-4③表示同一区间，前方列车 i_{m+1} 在前方站 j_{n+1} 直接通过，而后方列车 i_m 在后方站 j_n 停站后通过；图 2-4④表示同一区间，前后两列车在前后两车站均停站后通过。

(4) 列车不同时到发或发到间隔时间：在某单线或某双线区段上，任意方向列车到达车站与由同一车站向相同区间发出同向列车的最小时间间隔，被称为列车到发时间间隔；任意方向列车从车站发车与同方向列车到达同一车站的最小时间间隔，被称为列车发到时间间隔。如下图所示。

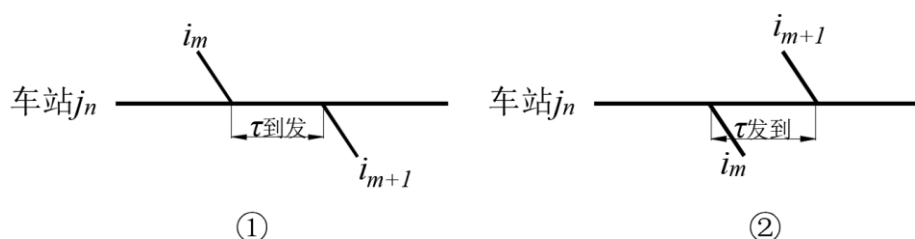


图 2-5 列车到发与发到间隔时间

Fig. 2-5 Arrival and Departure interval times of trains

(5) 追踪列车间隔时间

在铁路线路的某自动闭塞区段内，区间同方向运行的两列列车之间的最小间隔时间，被称为追踪列车间隔时间。该间隔时间主要取决于自动闭塞的方式，比如三显示与四显示自动闭塞区段的追踪间隔时间就存在差异。除此之外，还与列车自身性能参数、列车运行控制系统等因素密切相关。在城轨的移动闭塞制式中，因为后方列车必须在保障一定安全距离的条件下追踪前方列车，这样可以使得追踪列车间隔时间被尽可能的压缩，提高线路整体的通过能力。下图中图 2-6①表示的是单线区间追踪间隔，图 2-6②表示的是双线区间追踪间隔。

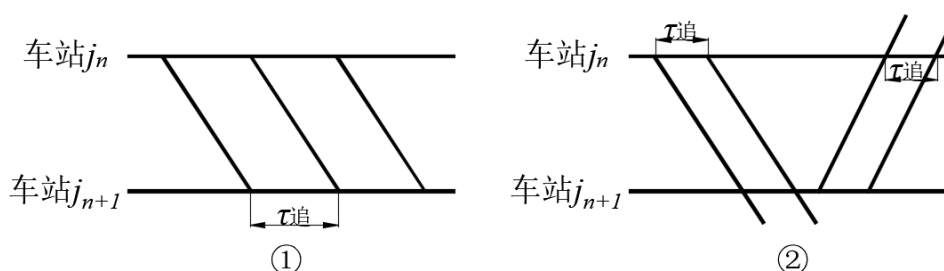


图 2-6 追踪列车间隔时间

Fig. 2-6 Tracking interval times of trains

(6) 综合维修天窗时间

铁路管理部门一般是在每日夜间的 0 时至 6 时，设置高速铁路综合维修天窗时间。在此期间，对高速铁路上的线路和设备进行综合的检测、保养和维修。一般可分为垂直天窗、同步天窗和 V 字天窗等。

2.1.2 列车晚点的影响因素

在列车能够在线路上与车站内安全稳定的运行，行车调度指挥系统起到了至关重要的作用。根据铁路调度的流程、工作职责以及行车指挥调度系统的相关特点，可将列车在运行过程中存在的影响因素可分为三方面：人为因素、设备因素和环境因素。

(1) 人为因素

铁路指挥调度系统整体属于典型的人机工程系统，所以系统的正常运行需要人与机

电设备的相互配合，但是人的本身也是由复杂的工程系统组成。所以人在操作过程中，一些不确定性的行为也就成为了影响列车运行过程的关键因素。

人为因素中可分为铁路内部人为因素和铁路外部人为因素两种，前者主要包括列车司机与列车调度员因素，当列车驾驶模式为人工模式时，由于驾驶列车的工作人员注意力不集中等原因，则可能会使列车偏离原运行计划，或者从事列车调度的工作人员出现失误，或者没有按照《铁路运输调度工作规则》进行工作等行为，都可能造成对列车运行的干扰；后者主要包括随机客流和乘客突发事件因素，当节假日客流剧增，列车运行则会表现出比较显著的后效性，进而容易导致列车发生延误并传播下去。乘客突发事件因素有可能是在列车上有部分乘客不小心或者故意违反了《铁路安全管理条例》，或者是有突发身体疾病的乘客，导致列车减速或者临时停靠，而造成晚点。

(2) 设备因素

导致列车晚点的设备因素总体上可以分为移动设备发生故障的情况和固定设备发生故障的情况，前者包括了列车车载设备故障、动车组设备故障等；后者包括了线路、信号、供电调度等设备的故障。

(3) 环境因素

外部环境因素的干扰，也是导致列车正常运行的重要影响因素。本文将所有自然环境因素和突发事件因素均归结为环境因素。虽然铁路运输受自然环境影响的可能性，相对而言还是比较小的，但是并不是说列车在运行的过程中不受自然环境影响。列车遇到恶劣的自然环境，比如大风、大雪、雷暴、地震等，均会对其产生不同程度的影响，严重的情况发生甚至可能导致列车运行的长时间中断。在2008年我国南方大雪冰灾期间，广铁集团管辖的粤、湘地区，由于大雪的原因铁路网大面积的处于瘫痪状态，同时也导致铁路接触网的停电，大多数靠电力驱动的机车都无法正常工作，列车运行的秩序也十分紊乱。

除此之外，在高速铁路网方面，既有线上运行的列车也存在干扰其运行的可能，尤其是当跨线列车发生晚点，容易导致晚点传播至高速铁路上，进而使高速列车也发生晚点。因此，本文把其它线路上的跨线列车对原高速列车的干扰也一并视作外部环境的影响，但是这种环境影响更多是人造的环境。为降低这种情况的影响，可运用本线高速列车优先的原则或阻断跨线列车在高速线上运行等行车调度方式，来确保高速列车的正常运行。

最后，列车的运行还受到一定概率的外部突发事件的影响，比如外界的人和动物的侵限，泥石流、地震的发生致使线路中断，还有存在一些无法干预的影响，比如高速铁路施工维修时间大于了天窗时间，进而影响到列车的正常运行等。

2.1.3 列车晚点情况分析

列车在运行过程中遇到晚点的情况，大致可分为两种情况，一种是列车自身的单列

车晚点，另一种是前方列车晚点后导致的连带晚点。

(1) 单列车的自身晚点

单列车自身晚点一般是在列车受到外界不确定因素的影响，比如线路与设备故障导致的延误晚点。这种情况的晚点只会对列车本身造成干扰，并不会对后续运行的列车在此干扰。如下图 2-7 所示，图中虚线表示的是列车计划运行的运行线，实线则表示的是列车实际运行的运行线。图 2-7 中的①表示列车在车站发生晚点的情况，即某列列车在车站 j_n 出发晚点时间 Δt ，且在区间并未做任何调整，在到车站 j_{n+1} 时，列车依旧晚点时间为 Δt 。图 2-7 中的②表示列车在区间发生晚点的情况，即列车在车站 j_n 正点按时发车，区间运行过程中发生干扰，导致列车减速行驶，在列车到达车站 j_{n+1} 时，晚点时间为 Δt 。

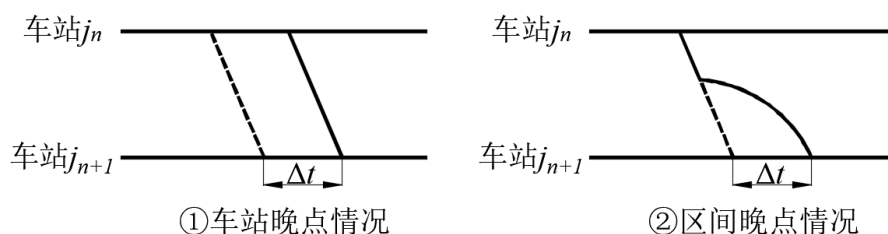


图 2-7 单列列车晚点的情况

Fig. 2-7 Delay of single train

(2) 列车的连带晚点

在列车正常运行的过程中遇到晚点的情况，在运行图编制的时候一般会预留一定的冗余时间，来方便列车运行的及时调整。但是当列车运行调整的时间远远大于运行图编制时所预留的冗余时间，列车就会产生晚点的情况，进而影响铁路行车秩序。当同一线路运行过程中，前一列车由于干扰发生晚点引发后一列车也相继晚点时，则称为晚点传播。列车的晚点传播表示在运行图上时，大致可分为四种情况，如下图 2-8 所示。图中的 Δt_1 表示前一列车发生晚点的时间， Δt_2 表示后一列车发生晚点的时间。

图 2-8①中，当 $\Delta t_2 = 0$ 说明前车发生晚点后，几乎没有影响后车正常运行，后车能够准点按图行车。图 2-8②中，当 $\Delta t_1 = \Delta t_2$ 说明前车与后车晚点时间一致，此时的列车晚点发生等值传播。图 2-8③中， $\Delta t_1 < \Delta t_2$ 说明后车晚点时间大于前车的晚点时间，并且影响到了后车的正常运行，称为列车晚点增强传播。图 2-8④中， $\Delta t_1 > \Delta t_2$ 说明后车的晚点时间小于前车的晚点时间，此时列车正逐渐恢复按图行车，称为列车晚点衰减传播。

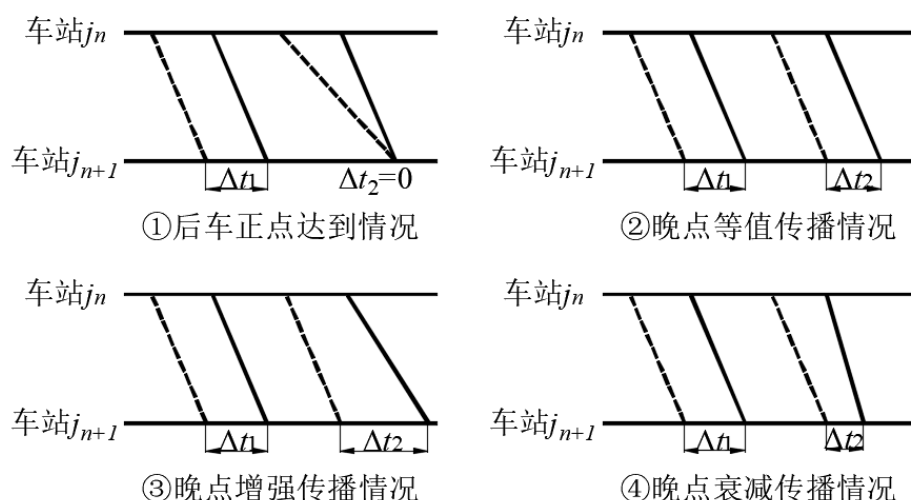


图 2-8 发生列车连带晚点的情况

Fig. 2-8 Train knock-on delay

2.1.4 列车运行调整方式

(1) 按站调整和按车调整

按站调整就是对某个车站 j_n 所有列车的运行计划进行重新进行安排,同时把列车在车站的发车顺序也进行重新安排。这种运行调整方式,已晚点的列车只对当前车站和即将达到当前车站的列车造成干扰,该方式能够最大限度的利用运行图中所预留的冗余时间进行调整,使所有列车在该站的到发时刻和发车次序最优。按站进行运行调整的方式具有一定的灵活性,不会有某一列车由于计划冲突干扰其它多列列车计划的情况,故在研究中经常采取这种方式。

按车调整就是对某一列车 i_n 的部分或整个行车计划重新调整,在完成了列车 i_n 调整后,再接着对列车 i_{n+1} 进行调整。在运用该方式进行运行调整时,若是列车 i_n 和列车 i_{n+1} 的运行计划不满足约束条件,则要对列车 i_{n+1} 的运行计划重新调整。所以前后车的相互影响程度较大,前车的运行状态的不同会对后续的列车运行计划造成大浮动的改变,同时这种方式并没有利用列车运行图在前期编制过程中的所预留的冗余时间。

(2) 人工调整和自动调整

列车运行调整的方式依据是否使用人工进行调整,还可以分为人工调整和自动调整,具体分类情况如下图 2-9 所示。

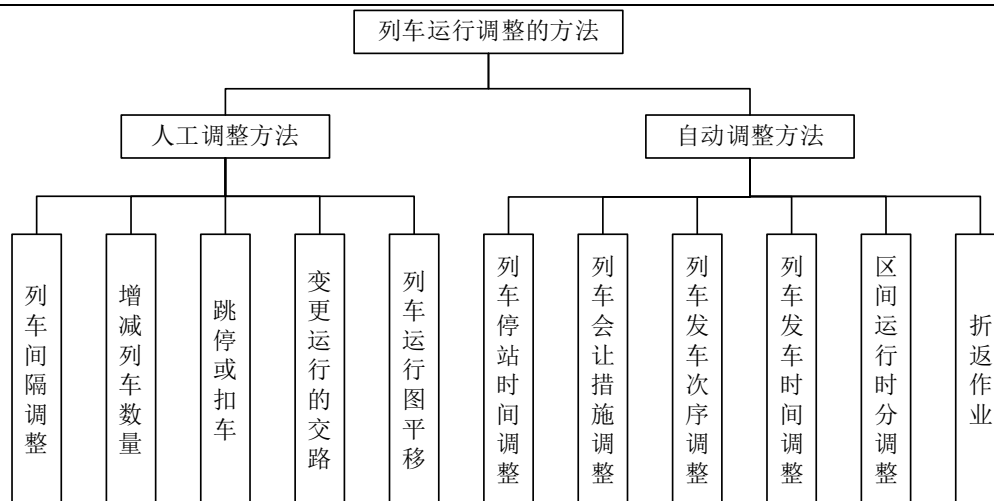


图 2-9 列车运行调整的方法

Fig. 2-9 Method of train operation adjustment

人工调整就是调度员使用人工绘制运行图的方式，对列车行车计划线等进行操作调整。该方式对调度员的实操技能要求比较高，需根据实时的运行情况和图定的运行计划，使制定的列车运行调整方案的晚点影响降低。这种方式也很大程度上取决于调度员的职业素养和能力。但是在铁路逐渐发展的过程中，人工调整的弊端也慢慢的显露出来了，比如：受到调度员的主观和水平影响、实时性和精确性难以保障等一系列问题。

自动调整是指在整个铁路行车指挥系统中，基于目前的计算机技术和相关智能优化算法进行的调整，能够使调整后的列车运行调整计划更加合理，从而弥补车站调度人员经验方面的不足，避免由人工调整可能产生的随机性。列车运行自动调整技术若是进一步研究，需要建立更加合理、更加科学的数学模型，运用能够快速求解模型参数的相关算法，优化运行调整结果。在列车自动调整的过程中，还需考虑到：列车的类型、区间运行方向、股道运用、各种时间间隔等诸多因素，最后计算出最优的运行调整方案。调度员可以选择自动调整得到的方案，以减少其工作量。

2.1.5 列车运行调整结果评价

列车在受到干扰导致晚点的情况下，为进一步整合分析晚点的实时情况和原因，有学者提出，可以将列车晚点的情况按车站的站台顺序或是按实际的运行顺序，进行函数曲线的绘制，这种曲线呈帽子状，如下图 2-10。

假设有列车 i_1 ，在行车途中经过车站 j_n 时，发生了晚点时间为 T ，晚点情况较为严重且在本站不会消除，还会对后续车站进行晚点传播。采取一定的运行调整措施后，晚点时间在后续车站 j_{n+1} 处缓缓下降，直到列车 i_1 在车站 j_{n+m} 处列车晚点情况才消除，恢复了图定的运行状态。因为整条函数曲线酷似帽子形状，故被称为“帽子曲线”。当指定区间所有列车均未发生晚点，且列车都能够正常的按图行车，此时的帽子曲线将与 x 轴

呈同一条水平线，如图 2-11 所示。

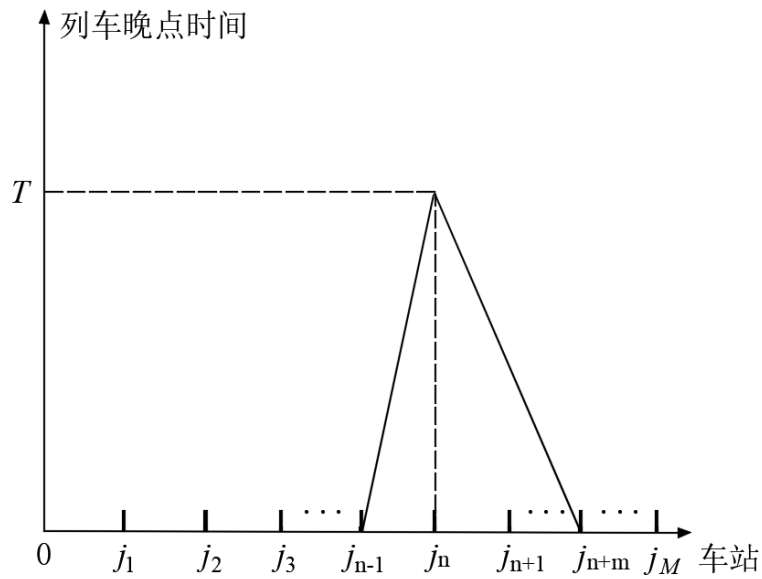


图 2-10 列车发生晚点时的帽子曲线

Fig. 2-10 Hat curve of train delay

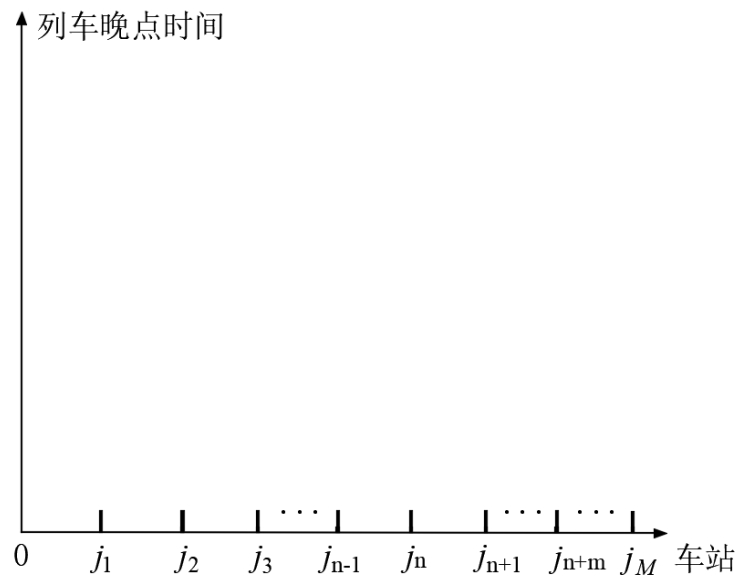


图 2-11 列车未发生晚点时的帽子曲线

Fig. 2-11 Hat curve of no train delay

上图所表示的帽子曲线能够对列车延误进行定性分析，当列车发生延误后，其延误程度和传播范围均能够从曲线的斜率和下降幅度观察出来。为了更好地评估调整结果，可以在模型研究过程中进行一些相关的定量指标分析。通过借鉴城市轨道交通调整结果的相关评价标准，并进行一定的改进，将其应用于铁路列车运行调整结果的评价中。列车晚点的定量分析指标主要包括列车到达晚点率、列车晚点传播区间数、晚点的列车总数等，这些指标能够很好的反应出运行调整的整体效果和质量。

(1) 列车到达的晚点率

列车到达的晚点率指的是,在列车运行过程中,线路上某列列车 i_m 在区间所有车站总到达晚点时间之和与列车 i_m 图定计划运行时间的比值,具体见下式(2-1)。

$$d_{i_m} = \frac{\sum_{n=1}^N (T_{i_m j_n}^d - T_{i_m j_n}^{d_0}) * \varphi(i_m)}{T_{i_m j_n}^{d_0} - T_{i_m j_1}^{d_0}} \times 100\% \quad (2-1)$$

其中, d_{i_m} ——列车 i_m 的到站延误率;

$T_{i_m j_n}^d$ ——列车 i_m 在车站 j_n 的实际到达时分;

$T_{i_m j_n}^{d_0}$ ——列车 i_m 在车站 j_n 的图定到达时分;

$T_{i_m j_1}^{d_0}$ ——列车 i_m 在第一个车站 j_1 的图定到达时分;

$\varphi(i_m)$ ——列车优先等级所对应的权重。

(2) 晚点传播区间数

晚点区间传播数指的是初始晚点列车对于后续列车的影响范围,具体的数学意义为列车 i_m 途经过的 n 个车站中存在晚点情况的车站数量,见下式(2-2)。

$$q = \sum_{n=1}^N \chi_{j_n} \quad (2-2)$$

其中, q ——列车延误传播的区间数量;

χ_{j_n} ——表示车站是否晚点的0-1变量,为0时表示车站存在晚点情况,为1时表示车站不存在晚点情况。

(3) 连带晚点的列车数目

当列车发生初始晚点后,在该列出现晚点列车之后通过同一车站的列车也可能出现晚点情况,可以用连带晚点列车总数来表示受初始列车晚点影响程度,见下式(2-3)。

$$F_{j_n} = \sum_{n=1}^N \chi_{i_m j_n} \quad (2-3)$$

其中, F_{j_n} ——在车站 j_n 发生连带晚点的列车数量;

$\chi_{i_m j_n}$ ——表示列车 i_m 在车站 j_n 是否发生晚点的0-1变量。为1表示列车 i_m 在车站 j_n 产生晚点情况,此时 $T_{i_m j_n}^d > T_{i_m j_n}^{d_0}$;为0时表示列车 i_m 在车站 j_n 未产生晚点情况。

2.2 到发线运用相关理论

2.2.1 到发线运用的相关要素

(1) 到发线数量

随着社会运输需求的发展，国内现存的铁路运输组织模式发生了很大程度的变化。现有的铁路线路都会安排很多连发和群发的旅客列车。列车的到达出发、旅客的出现都会表现出一定的时间分布规律。高速铁路动车组的到发特点有两种，分别为早高峰和晚高峰。在这两个时段内，如果列车过于密集的办理到发作业，并且动车组数量也远远无法匹配现实的需求量，那么车站对于到发线数量的需求也会增加。可是当车站处于平峰时期，与高峰期相比办理始发终到和接发作业的列车数会减少很多，进而对到发线数量的需求也会有不同程度的降低，所以到发线数量一般是在办理接发车的高峰期影响车站到发线的运用。

对于车站而言，列车在车站开行对数往往是影响该站每日的接发列车数量的重要因素，也同时影响车站的到发线数量。当某一铁路客运站需要确定到发线数量为多少合适时，通过查定到相应的列车数与到发线数量的关系，即可得知。如下表 2-1 所示，不同的始发终到列车数对应不同的到发线数量区间。

表 2-1 车站到发线数量关系表

始发终到列车数	到发线条数	始发终到列车数	到发线数量
小于 12	3	51~68	9~11
12~24	3~5	69~75	11~13
25~36	5~7	76~87	13~15
37~50	7~9	88~100 及以上	15 以上

(2) 咽喉道岔

咽喉是位于车站前后两端道岔分布较为密集的部位，可依据上下行方向对处于咽喉区的道岔进行编号。同时各类不同类型的道岔可组成咽喉区，链接区间正线与车站到发线。为充分增加咽喉的利用率，可增加一定数量的调车作业和接发车作业，进而提升车站的通过能力和生产效率。列车在进站、出站的接发车都会占用车站的咽喉区，并且每条进路占用的车站接发车进路和到发线都具有唯一性。

车站的信号员可依据值班员所制定的到发线运用计划，建立接发车和调车出入段的各种进路。在进路确定后，进路所经过的道岔号、占用哪条到发线以及占用到发线的时间也同时确定了。

2.2.2 到发线运用的调整方式

针对所有类型车站，其到发线运用的调整方式主要以下三种，如下图所示。

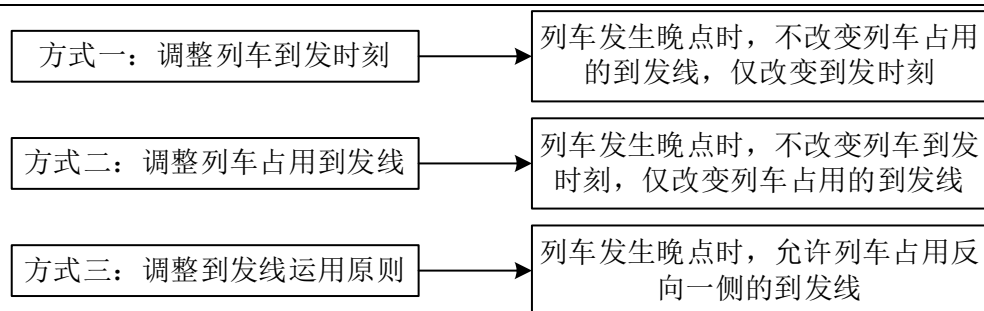


图 2-12 到发线运用的三种调整方式

Fig. 2-12 Basic adjustment mode of arrival departure track

方式一能够有助于列车保持原计划的到发线占用，但是一定程度上增加了晚点时间。方式二跟方式一相比可以进一步的降低列车的晚点时间，但是会导致列车改变到发线的占用情况。所以方式一和二是互补的，在调整到发线运用计划的时候，通常是有一部分列车同时调整了占用到发线和到发时刻。方式三把列车的到发线占用原则进行了调整，将列车调整到车站的另一侧进行接发车，改变了接发车的规则，列车由原本的顺接顺发变为反接反发，这样一来很大程度上增强了对车站咽喉区的干扰，而立折列车由顺接反发变为反接顺发后，也将进一步增加反切进站的干扰。

基于以上分析，本文所研究的列车晚点下的列车运行调整与到发线运用协同优化问题仅考虑方式一与方式二，不考虑方式三。

2.2.3 车站作业过程分析

(1) 始发列车的作业过程

动车组在动车段或动车所内完成整备维修后，根据实际的运输需求情况从动车所出段，经走行线抵达并停留在车站的指定到发线上。直到客运部门组织完旅客进站乘车后，办理发车作业。下表 3-1 为始发列车作业过程。

表 2-2 始发动车组列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	动车组出段	从动车段或动车所驶入车站到发线	咽喉区
2	出发技术作业	进行技术检测后，组织乘客进站上车	到发线
3	发车作业	办理区间闭塞，准备发车进路，开发信号机	咽喉区

(2) 终到列车的作业过程

终到列车在办理停车作业后，需停留在指定的到发线上，等待车站客运部门组织车上所有旅客下车后，经入段走行线进入动车段或动车所进行相关整备和维修。下表 2-3 为终到列车作业过程。

表 2-3 终到动车组列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	接车作业	办理区间闭塞, 准备接车进路, 开放车站信号	咽喉区
2	到达技术作业	进行技术检测后, 组织乘客到站和进站乘客上下车	到发线
3	动车组入段	动车组从车站驶入动车段或动车所	咽喉区

(3) 折返列车作业过程

折返列车可以看作是始发列车和终到列车的结合, 但是其中不包括进出动车段或动车所的作业过程。折返列车首先需要停留在指定的到发线上。直到终到旅客全部下车后, 经过折返线驶入其它到发线, 再次等待始发旅客全部上车后, 再办理出发作业。依据折返列车折返的方式进行划分, 可将其分为站前折返和站后折返, 作业过程分别如下表 2-4、表 2-5 所示。

表 2-4 折返动车组站前列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	接车作业	办理区间闭塞, 准备接车进路, 开放车站信号	咽喉区
2	到达作业	停在到发线上, 组织终到乘客下车, 始发旅客上车	到发线
3	折返作业	列车逆向驶入另一侧的正线	咽喉到发线
4	发车作业	办理区间闭塞, 准备发车进路, 开放车站信号	咽喉区

表 2-5 折返动车组站后列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	接车作业	办理区间闭塞, 准备接车进路, 开放车站信号	咽喉区
2	到达作业	停在到发线上, 组织终到乘客下车	到发线
3	折返作业	列车驶入逆向到发线后, 组织出发乘客上车	咽喉到发线
4	发车作业	办理区间闭塞, 准备发车进路, 开放车站信号	咽喉区

(4) 停站通过列车

停站通过列车办理接车作业接入到发线后, 等车站客运部门组织所有乘客上下车完毕后, 再发车。作业过程如下表 2-6 所示。

表 2-6 停站通过动车组列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	接车作业	办理区间闭塞, 准备接车进路, 开放车站信号	咽喉区
2	停车作业	停在到发线上, 组织到站乘客下车, 出发乘客上车	到发线
3	发车作业	办理区间闭塞, 准备发车进路, 开发信号机	咽喉区

(5) 不停站通过列车

不停站通过列车的作业流程相对其它的车站作业是最简单的, 不需要占用车站内任何一条到发线, 无特殊情况则直接从车站的正线通过, 进入下一运行区间。不停站通过列车的作业过程, 如下表 2-7 所示。

表 2-7 不停站通过动车组列车作业过程

作业次序	列车作业名称	列车作业内容	占用车站设备
1	接车作业	办理区间闭塞, 准备接车进路, 开放车站信号	咽喉区
2	通过作业	动车组列车直接通过车站正线	到发线
3	发车作业	办理区间闭塞, 准备发车进路, 开发信号机	咽喉区

2.2.4 咽喉区与到发线占用时间标准

高速铁路客运站中, 在接发列车及动车组出入动车段或动车所, 车站咽喉区的长度、动车组的长度、动车组的运行速度以及进路准备等多方面因素, 综合决定了列车占用咽喉区的时长。

(1) 接车进路占用车站咽喉区的时间

当车站开始准备办理接车进路时起, 直到列车停在警冲标内时止的时间, 就是接车进路占用车站咽喉区的时间。其计算公式如下式(2-4)所示。

$$\Delta t_{\text{接}} = t_{\text{准}} + t_{\text{进}} \quad (2-4)$$

其中, $t_{\text{准}}$ ——车站工作人员准备进路的时间;

$t_{\text{进}}$ ——准备好接车进路后, 到列车完全通过咽喉区所耗费的时长。

$t_{\text{进}}$ 的计算方式如下所示。

$$t_{\text{进}} = 0.06 \times \frac{L_{\text{进}}}{v_{\text{进}}} = \frac{l_{\text{确}} + l_{\text{制}} + l_{\text{进}} + l_{\text{列}}}{v_{\text{进}}} \quad (2-5)$$

其中, 0.06——km/m 转换为 m/min;

$L_{\text{进}}$ ——动车组进站的总长度;

$l_{\text{确}}$ ——经司机确认后的信号走行进路长度;

$l_{制}$ ——动车组的制动距离，也表示车站预告与进站信号机之间的长度；

$l_{进}$ ——进站信号机与到发线警冲标之间的长度；

$l_{列}$ ——动车组列车的总体编组长度；

$v_{进}$ ——动车组的平均进站速度。

(2) 发车进路占用车站咽喉区的时间

当车站准备办理发车进路时起，直到车尾通过车站另一端的进站信号机为止的时长，就是发车进路占用车站咽喉区的时间。其计算公式如下式(2-6)所示。

$$\Delta t_{发} = t_{准} + t_{出} \quad (2-6)$$

其中， $t_{准}$ ——车站内工作人员准备进路的时间；

$t_{出}$ ——从发车时刻开始，直到列车车尾通过最外方道岔尖端所耗费的总时长。

$t_{出}$ 的计算公式如下。

$$t_{出} = 0.06 \times \frac{L_{出} + l_{列}}{v_{出}} \quad (2-7)$$

其中，0.06——km/m 转换为 m/min；

$L_{出}$ ——动车组在车站的出站距离；

$v_{出}$ ——动车组通过车站的平均出站速度；

$l_{出}$ ——车站内到发线警冲标与最外侧道岔尖轨尖端之间进路的长度；

$l_{列}$ ——动车组列车的总体编组长度。

(3) 不停站通过列车占用咽喉区到发线的时间

不停站通过列车在车站由正线通过，需尽可能不减速的通过车站，其计算公式如下式(2-8)所示。

$$t_{通} = t_{准} + 0.06 \times \frac{l_{确} + l_{通}}{v_{通}} \quad (2-8)$$

其中， $l_{通}$ ——不停站通过列车从进入车站开始，由进站信号机到车尾部跨过最外侧道岔尖轨尖端的总长度；

$v_{通}$ ——列车直接通过车站时的平均速度。

当车站的到发线在办理技术作业时，主要的工作内容有多种：为方便旅客上下车，需提供合适的场地；为各种类别的动车组列车提供办理通过或停留的站线；为需要进行吸污、上下水作业的动车组提供相应设备；为可能被越行的列车提供能临时停留的车站站线。

(1) 到发线停留时间

当列车在到发线上停留，同时进行客运作业的时间，即列车在到发线上的停留时间。

该过程主要是由车站客运人员组织旅客上下车的时间、清洗列车的时间、车上物品配补的时间、折返列车司机走行至另一端车头的时间等多方面组成。当列车停留在到发线上时，车站所有部门的工作可以同步进行，以进一步减少列车在车站停留的时间。除此之外，列车在到发线上的停留时间还与列车运行图的编制息息相关，即便有一些列车的站内作业时间比较短，但是为了等待更高等级的列车，有一小部分列车会适当延长在车站停留的时间。

列车在站停留时间与始发终到旅客乘降时间的计算方法，可按式(2-9)、式(2-10)进行计算。

$$t_{\text{上}} = \frac{t_{\text{上}} \alpha m_{\text{满}}}{60mn} + \beta \quad (2-9)$$

$$t_{\text{下}} = \frac{t_{\text{下}} \alpha m_{\text{满}}}{60mn} + \beta \quad (2-10)$$

其中， $t_{\text{上}}$ ——取 4s，表示旅客自从站台上车时起至坐到车厢内对应座位时止的时间；

$t_{\text{下}}$ ——取 2.5s，表示旅客自下车离开车厢内对应座位时起至走到站台时止的时间；

α ——车辆定员人数；

$m_{\text{满}}$ ——车厢满员率；

m ——车门同时通过的旅客人数，取值为 1；

n ——一节车厢的车门数；

β ——为避免发生不必要的安全事故，且动车组出入段平稳运行，提前终止旅客乘降的时间，取 1 min 到 2min 之间。

(2) 到发线的额外占用时间

当列车占用车站的某条到发线时，其目的不仅仅是为了在到发线上停留进行相关作业，其实还包括了一些其它时间，这些时间被统称为到发线的额外占用时间，比如：列车接发车进路信号的开放时间、列车在车站进路上的走行时间等。根据规范中的时间标准，区间运行时速为 200 km/h 的动车组能占用到发线的额外时长为 3 分钟，区间运行时速为 300km/h 的动车组能占用到发线的额外时长为 2 分钟。

2.3 列车运行调整与到发线运用的相关性分析

分析列车运行调整与到发线运用的相关性，能够为本文优化模型的建立提供前置参考，增加建模过程的条理性。当列车流在运行过程中被干扰发生延误，如果以列车流为研究对象，则需要重新调整列车的运行计划，得到列车运行的调整方案；如果以单个列

车为研究对象，则需要重新调整列车的车站径路，得到到发线运用的调整方案。重新调整列车运行计划和列车车站径路存在相互制约的关系，进行运行调整的列车均有可行的车站径路，即可同时得到调整后的列车运行时刻表和到发线运用方案。综上，列车运行调整和到发线运用是相互约束、相互配合的，在对两者的目标进行计算时，可以考虑求解时的优先顺序。列车运行调整与到发线运用问题的相互性示意图，如下所示。

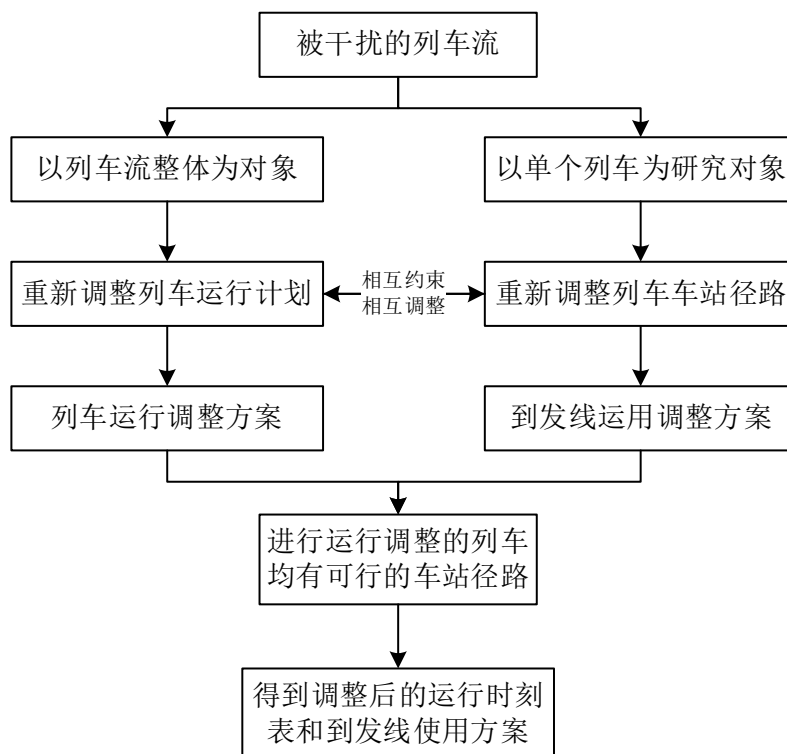


图 2-13 列车运行调整与到发线运用相关性示意图

Fig. 2-13 Schematic diagram of correlation between train operation adjustment and arrival departure track operation

2.4 本章小结

本章系统地归纳了列车运行调整与到发线运用的相关理论基础，阐述了列车运行调整中列车晚点的影响因素、晚点情况以及运行调整的方式和结果评价；到发线运用中的原则、调整方式、车站作业过程和占用时间标准，最后对列车运行调整与到发线运用两者的相关性进行了分析，为下文建模分析过程提供了一定的理论基础。

第三章 列车运行调整与到发线运用协同优化建模分析

3.1 问题描述

列车运行调整与到发线运用的协同优化涉及的目标与约束较多，通过合适的问题描述对模型进行表达是建立优化模型的关键。

3.1.1 列车运行调整描述

选用双线自动闭塞高速铁路的单一方向线路为研究对象，且假设列车仅在车站内发生晚点。为后续便于程序设计以及晚点情况的表达，将列车运行图的车站分别用到达线与出发线进行表示。图中的横轴表示时间，图中的纵轴表示车站，列车运行线与到达线和出发线的相交的交点，即列车当前车站的到达时间与出发时间。将列车运行图划分成，以分钟为单位长度的 1440 个离散时间点集合，进入运行调整时间段的列车集合为 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m, \dots, i_M\}$ ，列车运行调整区段内的车站集合为 $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n, \dots, j_N\}$ ，具体如下图所示。

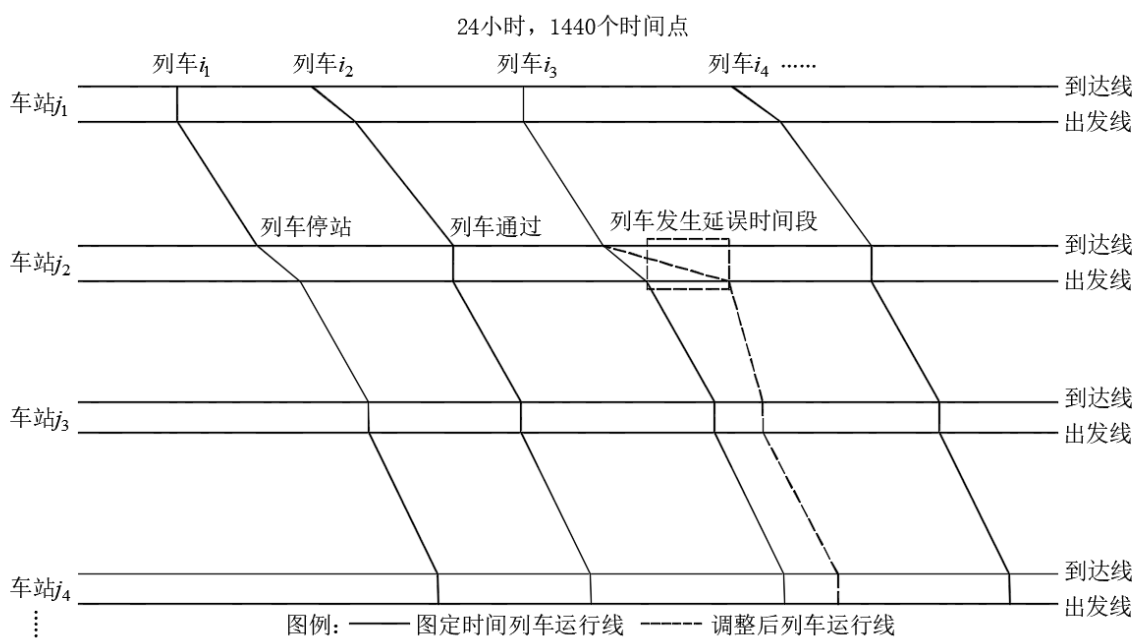


图 3-1 列车运行图的离散化表示

Fig.3-1 Discrete representation of Train operation diagram

3.1.2 到发线运用调整描述

选用双线自动闭塞高速铁路车站，单一方向线路的到发线集合为研究对象，且假设每个车站的到发线资源充足。当原计划接发列车的到发线处于被占用状态，或是无法使用时，列车即可调整至空闲的到发线，办理接发列车作业。列车 i_m 在车站 j_n 的到发线集

合为 $K_{j_n} = \{l_1, l_2, \dots, l_{k_n}\}$ ，具体如下图所示。

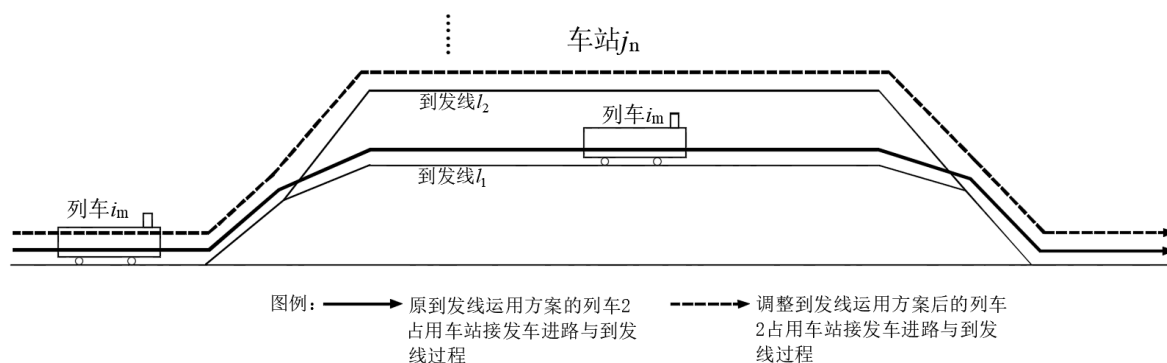


图 3-2 到发线运用调整示意图

Fig.3-2 Application adjustment of arrival departure track

3.2 模型假设

当列车有晚点情况发生，调度员将列车运行调整与到发线运用结合，并根据故障信息，在短时间内及时做出决策，是一项困难性较高的工作。这个过程中需要考虑的因素非常复杂，如：列车运行时的安全性、列车及车站设备的能力约束以及场站的各项调度规则等方面。为了简化建模过程中的不必要因素，本文结合铁路车站现场实际调度情况，做出如下假设：

(1) 列车若发生非中断突发情况，导致晚点，其延误时间均可体现在列车的到发时刻上，所以本文晚点情况仅考虑列车在车站内的到达晚点。

(2) 车站出现晚点的情况后，在列车出现晚点伊始，列车晚点具体时间并不确定，需要调整接下来使用晚点列车所占用到发线后一系列列车的到发线运用方案。

(3) 高速列车正常运行情况下，都是严格按图行车。本文假定各列车在发生晚点前与恢复图定运行时间后，都严格按照运行图运行。

3.3 模型的建立

在某一铁路调度区段内，列车运行调整需要满足的约束有：最小到发时间间隔、区间最小运行时分、最小停站时间等。所有列车在车站的到发线运用，需满足的约束有：接发车唯一性、到发线选择的唯一性、到发线被占用约束、到发线占用数量约束等。

3.3.1 列车运行调整约束

(1) 同一车站，前后两列不同的列车到达该车站时，具有一定的时间间隔，并且均满足最小到达时间间隔和最小出发时间间隔：

$$T_{i_{m+1}j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq T_d \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (3-1)$$

$$T_{i_{m+1}j_n}^c - T_{i_mj_n}^c \geq T_c \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (3-2)$$

(2) 列车在同一区间前后相邻两站之间的运行时间, 必需满足列车最小运行时分, 并加上起停附加时分:

$$T_{i_mj_{n+1}}^d - T_{i_mj_n}^c \geq T_{i_m, j_n-j_{n+1}} + t_q + t_t \quad \forall i_m \in I, \forall j_n, j_{n+1} \in J \quad (3-3)$$

(3) 列车若在某站停车, 作业时间不得小于该车站的最小作业时间:

$$T_{i_mj_n}^c - T_{i_mj_n}^d \geq T_{i_mj_n} \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (3-4)$$

(4) 所有列车发车时间不得早于图定出发时分:

$$T_{i_mj_n}^c - T_{i_mj_n}^{c_0} \geq 0 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (3-5)$$

(5) 相邻两列车到达通过同一站的时间不得小于其最小间隔时间:

$$T_{i_{m+1}j_n}^d - T_{i_mj_n}^d \geq T_{j_n-j_n} \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (3-6)$$

(6) 列车越行条件 (后车 i_{m+1} 满足该条件, 才能越行前车 i_m):

$$\eta(i_{m+1}) > \eta(i_m) \quad (3-7)$$

$$T_{i_{m+1}j_n}^d - T_{i_mj_n}^d \geq \beta_{i_mj_n} (T_d + t_t) \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (3-8)$$

$$T_{i_{m+1}j_n}^c - T_{i_mj_n}^c \geq \beta_{i_mj_n} (T_c + t_q) \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (3-9)$$

3.3.2 到发线运用约束

(1) 列车占用咽喉区接发车进路和到发线, 两者的唯一性约束。每列车在进站时, 只能占用一个接发车进路和一条到发线。

接发车进路唯一性:

$$\sum_{w=1}^{g_n} y_{i_mj_nl}^w = 1 \quad \sum_{r=1}^{h_n} y_{i_mj_nl}^r = 1 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (3-10)$$

到发线选择唯一性:

$$\sum_{l=1}^{k_{j_n}} x_{i_mj_nl} = 1 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (3-11)$$

(2) 到发线与接发车进路的选择确定:

$$x_{i_mj_nl} = \sum_{w=1}^{g_n} y_{i_mj_nl}^w = \sum_{r=1}^{h_n} y_{i_mj_nl}^r \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (3-12)$$

(3) 到发线被占用约束:

$$\sum_{T_{i_{m+1}j_n}^d \in [T_{i_mj_n}^d, T_{i_mj_n}^c]} x_{i_mj_nl} + x_{i_{m+1}j_nl} \leq 1 \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (3-13)$$

(4) 到发线被占用数量约束:

$$\sum_{i_m \in I} \sum_{j_n \in J} \sum_{l \in K_{j_n}} x_{i_mj_nl} \leq k_n \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (3-14)$$

3.3.3 目标函数

列车运行调整的研究对象是宏观层面的列车流的变化调整,是针对晚点列车和晚点传播后,列车到发时刻需进行实时调整的问题;而到发线运用的研究对象则是从车站的微观层面考虑,解决晚点列车和晚点传播后列车的到发线占用问题,因此列车运行调整与到发线运用的协同优化模型涉及到的问题,是宏观与微观层面相结合的组合优化问题,至少需要考虑两个问题的优化。

(1) 总到发晚点时间

当列车偏离图定运行计划后,不同速度等级的列车晚点后,其类型也有一定的差异,并且调整措施也不相同。高等级列车相比于低等级的列车来说,运行调整所产生的效益较大。同时用于评价运行调整目标的类型也较多,本文使用的优化目标为总加权到发晚点时间最小, $\varphi(i_m)$ 为不同等级高速列车的权重,目标函数为:

$$\min Z_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(i_m) * [(T_{i_mj_n}^d - T_{i_mj_n}^{d_0}) + (T_{i_mj_n}^c - T_{i_mj_n}^{c_0})] \quad (3-15)$$

(2) 到发线占用费用

在到发线运用方面,应考虑到调整过程中对于车站作业秩序的影响程度最小,即尽量少的去调整到发线运用方案。所以,到发线运用问题的最优化目标为列车占用到发线的总费用最小,即尽量选择对车站作业秩序影响较小的到发线。由于列车在车站停站通过时,选用非原到发线运用方案后,车站内人员、设备、场站之间工作调整,存在一定的复杂性,表达目标函数时,对于不符合原到发线运用方案的列车占用到发线情况进行统一,采取仅考虑单一权重的方式。 $\omega_{i,l}$ 为表示列车 i_m 占用到发线 l 的权重,取值为 1 和 100。 $\omega_{i,l}$ 取 1 时表示列车 i 在占用车站到发线 l 时,符合原到发线运用方案且不产生多余费用。当 $\omega_{i,l}$ 取 100 时,表示列车 i 可以占用到发线 l ,但是不符合原到发线运用方案,即产生多余费用。在现场实际操作时,应当首选 $\omega_{i,l} = 1$ 的到发线,但是在 $\omega_{i,l} = 1$ 的到发线能力紧张的情况下,确保不产生多余的干扰,则可以视情形选用 $\omega_{i,l} = 100$ 的到发线办理接发车作业。目标函数为:

$$\min Z_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{k_{j_n}} \omega_{i_m,l} * \varphi(i_m) * x_{i_mj_nl} \quad (3-16)$$

3.4 模型分析

在研究上述模型的求解算法前，对模型进行合理的分析是求解问题的关键步骤。本文所建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型是多目标规划模型，直接进行求解的话是非常困难的。对模型进行适当处理或者运用合适的求解方法，可以降低模型的求解难度。

3.4.1 多目标模型的整合方法

针对多目标的规划问题的求解方式，本质就是需要建立好单目标与多目标之间的联系，并采用一定方法判别解和解集的精确性和稳定性。相比于单目标规划，多目标规划是多维度的问题，在一般情况下最优的解可以有无数个，同时多目标规划问题的求解方法也主要在于如何将其本身转化为单目标的形式进行求解。现在众多学者常用的多目标求解方法有如下几种：

(1) 约束法

约束法的实质是依据所需要解决问题的实际意义，将多个目标中的一个确定为主要的目标函数，把剩余目标视为主要目标的约束条件，令多目标规划问题转化以主要目标为求解目标的单目标规划问题。记 $f_i(X)$ 为多目标中的主要目标，通过选取适当的函数取值区间 $M_j (j=1, \dots, i-1, i+1, \dots, n)$ 把剩余的 $n-1$ 个目标函数作为前者的约束条件，即可转化为如下单目标规划问题。

$$\min f_i(X) \quad (3-17)$$

$$\text{s.t.} \quad X \in \left\{ S \mid f_j(X) \leq M_j, j=1, \dots, i-1, i+1, \dots, n \right\} \quad (3-18)$$

求解上述的单目标问题，即可得到原多目标问题的满意解。该方法在求解多目标问题时，是比较简单并且可行的。在尽可能保留次要目标取值的前提下，求得主要目标的最优值，所以在解决实际问题方面也非常适用。

(2) 线性加权法

线性加权法的实质是依据 n 个目标函数 f 的求解重要程度，进行相应的权重系数赋值，根据所解决问题的实际考量，优先赋予较重要的目标更大的权重系数，接着将目标函数加权的总和作为新的目标函数，将原多目标规划问题简单化，转化为便于求解的单目标规划问题，如下。

$$\min \lambda^T f(X) = \sum_{j=1}^n \lambda_j f_j(X) \quad (3-19)$$

$$\text{s.t.} \quad X \in \left\{ R^n \mid g(X) \geq 0, h(x) = 0 \right\} \quad (3-20)$$

这种方法得到的解，是多个目标在加权处理后的最优解，是目标在同一量纲条件下非常适用的一种方法。

(3) 理想点法

理想点法的求解思路是优先确定所有目标的最优值 f_i^* ，即：

$$f_i^* = \min_{X \in R} f_i(X) \quad i=1,2,\dots,n \quad (3-21)$$

由上式可将理想点表达为 $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)^T$ ，由此构建的单目标问题可表达为：

$$\min_{X \in S} \|f(x) - f^*\| \quad (3-22)$$

运用该方法所求得单目标规划的最优解，仅为原多目标规划的有效解。

(4) 功效系数法

功效系数法的实质是运用模糊数学领域的求解思想，首先对多目标规划的最值问题进行模糊化，构建基于原问题的功效系数函数，接着求得全部功效系数的加权或者乘积的最优解，如下所示。

$$\min_{X \in D} \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)\} \quad (3-23)$$

$$\begin{cases} f_{i \min} = \min_{X \in D} f_i(X) \\ f_{i \max} = \max_{X \in D} f_i(X) \end{cases} \Rightarrow d_i(X) = \frac{f_{i \max} - f_i(X)}{f_{i \max} - f_{i \min}} \quad (3-24)$$

$$d_i(X) \in [0,1], i=1,2,\dots,n$$

进而可把原多目标规划问题转化为：

$$\max_{X \in D} \sum_{i=1}^n d_i(X) \quad (3-25)$$

(5) 分层序列法

分层序列法适用于求解两个或者两个以上目标，不适合用加权转化为单目标规划问题的情况。需要在求解前对目标的优先等级进行确定，同时求解时设定各个等级目标的检验数集合 Q_n 。在算法迭代的过程中，当检验数为非负时，即可进行低层级的目标求解。若所有的检验数集合都为非负数时，即可达到整体多目标规划的满意解。

$$Q_1 \gg Q_2 \gg \dots \gg Q_n \quad (3-26)$$

运用分层序列法的思想对目标规划模型进行求解时，需要对每个层级的目标设定检验数行。在单纯形表中，一般是优先放置高等级目标函数的检验数，再放置低一层次目标函数的检验数。优先进行 Q_1 行检验数的求解，当 Q_1 行检验数全部为非负后，即得到了最高层级目标的最优解，接着进行 Q_2 行检验数的求解。依据优先层级的顺序对目标进行逐个计算。最后，当 Q_n 行全部为非负，便得到整体目标规划问题的满意解。

3.4.2 目标函数的转化

本文所建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型，属于复杂的多目标规划问题，同时涉及到宏观与微观层面，要求两者的目标同时达到最优是很困难的。但是，从宏观与微观角度分析，列车运行调整与到发线运用两者是有明显的重要层次，在实际的铁路运输调度过程中，往往是优先满足宏观层面的列车流稳定，其次再是车站内部的相关组织调度。因此，本文运用多目标规划方法中分层序列法的思想，来求解上述建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型，列车运行调整目标函数的层级大于到发线运用目标函数的层级。

设列车运行调整目标总到发晚点时间为优先层级，定义为 QZ_1 ；到发线运用目标到发线占用费用为后一层次，定义为 QZ_2 。列车运行调整与到发线运用协同优化模型，可表达为：

$$QZ_1 = \min Z_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(i_m) * [(T_{i_m j_n}^d - T_{i_m j_n}^{d_0}) + (T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^{c_0})] \quad (3-27)$$

$$QZ_2 = \min Z_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{k_{j_n}} \omega_{i_m l} * \varphi(i_m) * x_{i_m j_n l} \quad (3-28)$$

s.t.

$$QZ_1 > QZ_2$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq T_d \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^c - T_{i_m j_n}^c \geq T_c \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J$$

$$T_{i_m j_{n+1}}^d - T_{i_m j_n}^c \geq T_{i_m, j_n - j_{n+1}} + t_q + t_t \quad \forall i_m \in I, \forall j_n, j_{n+1} \in J$$

$$T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^d \geq T_{i_m j_n} \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J$$

$$T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^{c_0} \geq 0 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq T_{j_n - j_n} \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J$$

$$\eta(i_{m+1}) > \eta(i_m)$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq \beta_{i_m j_n} (T_d + t_t) \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^c - T_{i_m j_n}^c \geq \beta_{i_m j_n} (T_c + t_q) \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J$$

$$\sum_{w=1}^{g_n} y_{i_m j_n l}^w = 1 \quad \sum_{r=1}^{h_n} y_{i_m j_n l}^r = 1 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n}$$

$$\sum_{l=1}^{k_{j_n}} x_{i_m j_n l} = 1 \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J$$

$$x_{i_m j_n l} = \sum_{w=1}^{g_n} y_{i_m j_n l}^w = \sum_{w=1}^{h_n} y_{i_m j_n l}^r \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n}$$

$$\sum_{T_{i_{m+1}j_n}^d \in [T_{i_m j_n}^d, T_{i_m j_n}^c]} x_{i_m j_n l} + x_{i_{m+1} j_n l} \leq 1 \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n}$$

$$\sum_{i_m \in I} \sum_{j_n \in J} \sum_{l \in K_{j_n}} x_{i_m j_n l} \leq k_n \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n}$$

3.5 本章小结

本章对列车运行调整与到发线运用协同优化问题进行了建模分析，确定了以总到发晚点时间最少与到发线占用费用最小为优化目标，列车运行调整约束考虑最小到发时间间隔、区间最小运行时分、最小停站时间等；到发线运用约束考虑了接发车唯一性、到发线选择唯一性、到发线被占用约束等。在模型分析方面，本章根据多目标规划求解特点，分析了现有求解多目标规划的五种方法，分别是约束法、线性加权法、理想点法、功效系数法和分层序列法，并且依据列车运行调整与到发线运用两个问题的宏观与微观层次，确定引入分层序列法对模型的目标进行处理。优先层级的目标为列车运行调整的总到发晚点时间最少，其次的目标为到发线运用的占用费用最低，以便后续模型求解。

第四章 算法设计

本文所建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型属于多目标整数规划,求解难度较大。有部分学者采用分支定界法、动态规划等精确算法来求解单独的列车运行调整问题与单独的到发线运用优化问题,但是对于多目标问题的求解大多是采用启发式算法。目前大多数学者使用率较高的启发式算法主要有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、模拟退火算法、元胞自动机等。由于跟其他算法相比,鸽群优化算法具有实现性强、收敛速度快、鲁棒性强、需要调整的参数少,能在短时间内求解的特点,故本文选用鸽群优化算法对模型进行求解。

4.1 群体智能算法

群体智能算法^[47]是基于生物种群特性的智能化算法,通过模拟自然界里的昆虫、动物等有机生命的群体行为,这些自然界的生物群体会为了生存以群体聚集的方式进行生命活动,群体中的每个个体通过学习本能、其他个体或者整个种群群体的经验,来进行活动。模拟生物的行为机制,而设计出来用于求解实际问题的算法策略,均被称为群体智能算法。因为具备较优的特性,所以这些群体智能算法能够超越目前一些传统的优化算法。如今应用于数学模型求解方面的群体智能算法有很多,例如:遗传算法^[48]、粒子群算法^[49]、蚁群算法^[50]、人工蜂群算法^[51]、萤火虫算法^[52]、鸽群优化算法^[53]等。在多数群智能算法被提出后,后续研究都会针对算法其本身的不足和需要求解模型的特点,进行一定程度的改进。

改进遗传算法有基于改进模糊自适应的遗传算法^[54]、利用量子遗传优势的量子遗传算法^[55]等。改进粒子群算法有基于指数惯性权重衰减的粒子群优化算法^[56]、基于进化状态自适应调整惯性权重的粒子群优化算法^[57]、改进速度更新公式和具有动态学习因子的粒子群优化算法等^[58]。改进蚁群算法有基于免疫原理的蚁群算法^[59]、基于特征加权的蚁群算法^[60]、结合 A*算法的改进蚁群算法^[61]等。改进人工蜂群算法有自适应-混沌策略人工蜂群算法^[62]、改变蜜源搜索方式的人工蜂群算法^[63]等。改进萤火虫算法有基于极值优化的萤火虫算法^[64]、用于解决云资源协调问题的混沌萤火虫算法^[65]等。

4.2 基本鸽群优化算法

在自然界中的很多生物都具有群体性,通过观察这些生物群体的生活运动规律,并在计算机的数学建模中进行应用,成为了众多学者的研究目标。基本鸽群优化算法是北京航空航天大学段海斌教授通过鸽群的归巢习性,总结提出的一种比较新的群智能算法。这种算法充分的结合了计算机科学和仿生学这两门学科,此外该算法为其它的群智能算

法也提供了一定的参考价值，具有非常重要的意义。

4.2.1 鸽群优化算法概述

鸽群优化算法是依据鸽群会受地磁与地标影响而具有归巢习性，对鸽子整个飞行过程进行模拟，设计出的一种较简易的群智能算法。该算法原理简洁明了，在设计过程中需要调节的参数较少，在编程时相对其他算法容易实现，同时鲁棒性也较强。鸽群优化算法中有两个基本部分，分别为：指南针算子、地标算子。当目的地距离鸽子较远时，它利用的是附近的地磁场来判别飞行方向。当目的地距离较近时，则用附近熟悉的地标来定位飞行。

(1) 指南针算子：鸽群前期在飞行的过程中，判断方向的依据主要来自地磁场，通过地磁场来不断的调整飞行方向。在函数优化问题方面，鸽群算法就是把每个可行解作为单独的个体 i ，并且每个单独的个体都有相应位置和速度，分别记为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 和 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ ，其中 $i \in \{1, 2, \dots, Np\}$ ， Np 表示目标可行解的总数， D 表示维度数，每个单独个体的位置和速度，在 D 维的解空间中，每次都是随着算法迭代而更新的。在第 t 次的迭代中，每个个体的位置 X_i 与速度 V_i 都可以由如下公式进行再次更新。

$$V_i(t) = V_i(t-1) * e^{-Rt} + rand * (X_g - X_i(t-1)) \quad (4-1)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (4-2)$$

上式中， R 表示的是指南针算子中的指南针因子， $rand$ 是取 0 至 1 之间的一个数值， X_g 表示的是目前为止全局的最优位置，可以视作是指南针所指向的位置，这个最优位置可以通过对比全部鸽子的实际位置，并挑选出最优适应度值的个体来得到。这样的迭代过程在多次执行后停止，并且把求得的 X_i 传递至地标算子阶段继续求解。比较直观的指南针算子模型，如图 4-1 所示。

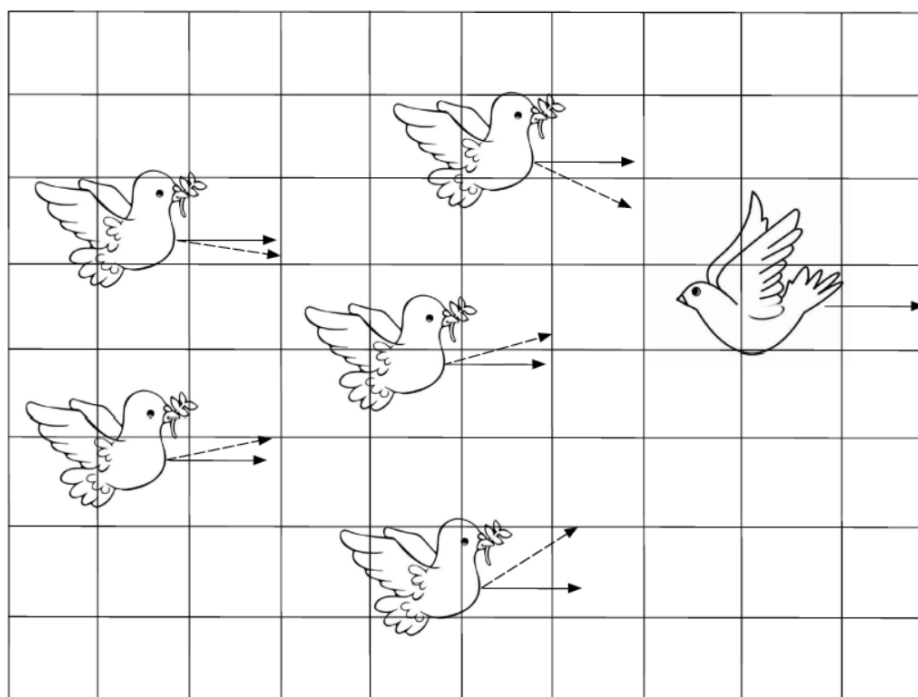


图 4-1 指南针算子模型的示意图

Fig. 4-1 Schematic diagram of compass operator model

(2) 地标算子: 当某个个体在这个阶段飞行过程中, 逐渐接近理想的目的地时, 它会找寻到附近熟悉的地标进行导航, 假如某个个体在附近无法找到熟悉地标, 那么这个个体便会直接飞向目的地; 假如在个体附近并不存在熟悉地标, 那么个体便会跟随着熟悉其它地标的鸽子飞到目的地。在算法的迭代过程中, 每次迭代均需将鸽群的数量 N_p 减半, 择优选择适应度排名靠前的一半鸽子当作种群, 接着计算剩下鸽群的位置中心 X_c , 求解本文模型的地标算子为列车的图定运行时间与原到发线运用方案, 将其作为参考方向, 根据下式对每只鸽子的位置进行更新。

$$N_p(t) = \frac{N_p(t-1)}{2} \quad (4-3)$$

$$X_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} X_i(t) * fitness(X_i(t))}{N_p(t) * \sum_{i=1}^{N_p} fitness(X_i(t))} \quad (4-4)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + rand * (X_c(t) - X_i(t-1)) \quad (4-5)$$

上式中, $fitness()$ 是用来评价解质量的函数, $rand$ 是随机取 0 至 1 之间的一个数值。鸽群优化算法在地标算子阶段的总体参考方向是那些相对较优个体的位置中心, 因为该阶段没有个体自身的速度和惯性干扰, 种群能够在很短的时间内快速收敛, 并且得到最

优值。当算法的迭代总次数达到了初始设定的最大值，地标算子停止运行，输出最优值。地标算子的模型如下图 4-2 所示。

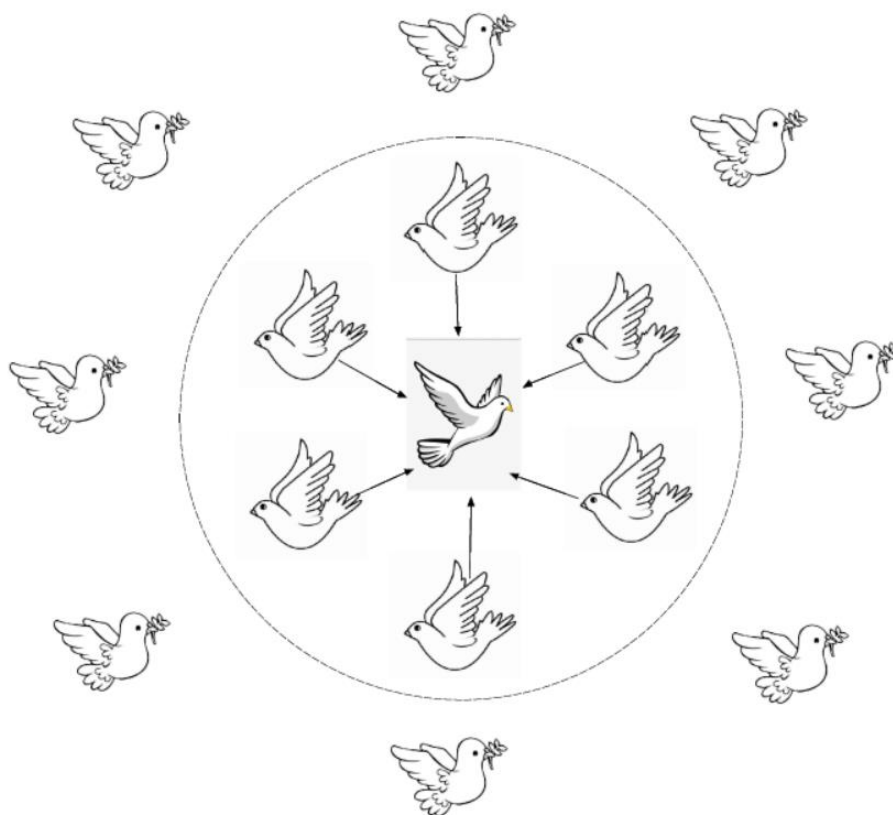


图 4-2 地标算子模型示意图

Fig. 4-2 Schematic diagram of landmark operator model

4.2.2 鸽群优化算法步骤

鸽群优化算法的具体步骤如下：

Step1: 依据实际环境进行建模、初始化地形信息和威胁信息，包括威胁的中心坐标，半径和威胁级别。

Step2: 对鸽群优化算法的相关参数进行初始化，解空间的维度数 D 、鸽子的种群规模 Np ，指南针因子 R ，两种算子的最大迭代次数分别为 $Nc1$ 和 $Nc2$ ，其中要求 $Nc1 > Nc2$ 。

Step3: 设置鸽群中每只鸽子的初始随机速度和飞行路径。比较鸽群中每只鸽子的适应度值并进行排名，找出初始最优路径。

Step4: 操作指南针算子。首先，通过利用公式 (4-1) 和 (4-2) 对每只鸽子的速度和路径进行更新。接着，对所有鸽子路径的适应度值进行排名，找出新的最优路径。

Step5: 当 $Nc > Nc1$ ，停止操作指南针算子，进入下一步操作。否则，继续进行 Step 4。

Step6: 依据公式(4-3)，将适应度较低的一半鸽子剔除，接着依据 (4-4) 找到所有鸽

子的中心位置，将其视为理想的目的地，所有鸽子将飞向该地，依据公式(4-5)调整鸽子飞行方向。保留最优的路径方案和适应度值。

Step7: 当 $Nc > Nc2$ ，停止地标算子的操作，并输出结果。否则，转到 Step6 继续进行迭代。

其算法流程图如下：

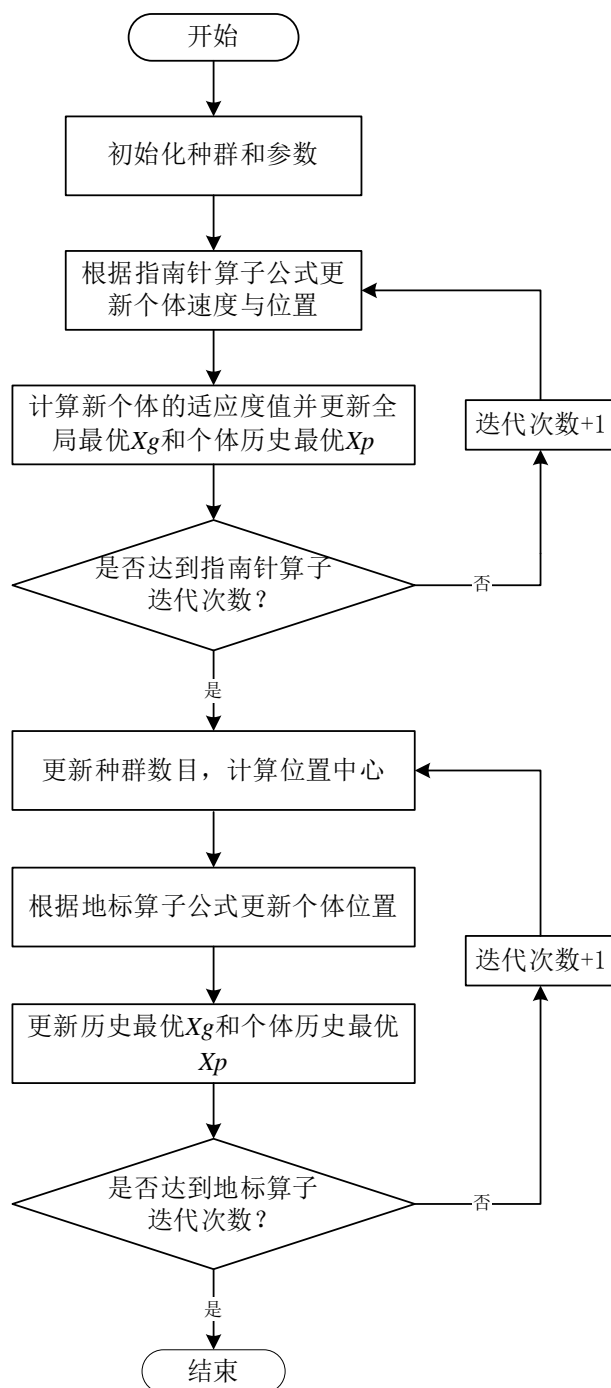


图 4-3 基本鸽群优化算法流程图

Fig. 4-3 Flow chart of basic PIO algorithm

4.3 基于分层序列-改进鸽群优化算法的模型求解

上一章节对本文所建立的列车调整与到发线运用协同优化模型进行分析后,得出模型目标具有宏观与微观的特性,所以在求解方面适合运用分层序列法。本文将分层序列法与鸽群优化算法相结合,提出一种适用于求解列车运行调整与到发线运用协同优化模型的分层序列-鸽群优化算法。

4.3.1 鸽群优化算法的改进

鸽群优化算法虽然在收敛速度方面具有一定的优越性,但是鸽群优化算法跟其他群体智能算法有一样的缺点,那就是非常容易陷入局部最优解。目前已有很多学者对此进行了改进,比如:郭瑞等^[66]将速度和位置因子引入算法中,增加鸽群整体的多样性来达到扩大求解范围;段海滨等^[67]将一些生物捕食逃逸机制引入到鸽群优化算法的求解过程中,令算法在求解目标函数时,不容易陷入局部最优。本文从三方面对基本鸽群优化算法进行改进优化:在种群的初始化阶段,运用混沌策略增加种群整体的多样性,同时结合反向策略令初始解的整体空间覆盖率更大;在参数的设置方面,为了能够对指南针算子 R 实行动态的调整,令算法前期能够更快更大范围的进行搜索,在后期可以迅速进行收敛,进一步的平衡了全局和局部搜索;最后,在地图单元阶段引入柯西扰动,地标单元阶段引入高斯扰动,令鸽群优化算法在陷入局部最优的情况后,可以迅速跳出来继续进行寻优求解。

(1) 初始解的改进

基本鸽群优化算法在初始的搜索过程中,方向是随着最优解或是次优解进行更新迭代的。若是初始化后,解相对比较集中且不散,同时最优解的位置与正常的全局最优位置又间隔比较远时,突然的偏差可能就会令个体偏离正确的方向进行搜索,很有可能根本找不出全局的最优解,陷入局部最优的情况。混沌理论有三个特点,分别是:具有随机性、对初始化的解的敏感度高以及具有能够完整遍历运动轨迹的特点。运用混沌理论对基本鸽群优化算法进行初始化,能够直接让初始解的种群多样性增加,防止算法过早的收敛。

可以通过 Logistic 方法来产生初始的混沌变量。具体如下:

$$X_{n+1} = \sigma * X_n * (1 - X_n) \quad n \in \{0, 1, \dots, N\} \quad (4-6)$$

初始值 $X_0 \in (0, 1)$, $X_0 \neq 0.25, 0.5, 0.75$, 令 $\sigma = 4$, 整个鸽群系统将会达到完全混沌的初始状态, $X_n \in (0, 1)$ 。公式(4-6)可以在系统中,随机的产生 0 到 1 之间的随机数,此时若鸽群优化算法所需求解的解空间范围为 $[N_{\min}, N_{\max}]$, 解空间的维度为 D 。那么算法中的个体值便可利用下式进行初始化。

$$N_{i,j} = N_{\min,j} + X_n * (N_{\max,j} - N_{\min,j}) \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (4-7)$$

上式中, X_n 表示 Logistic 映射, $N_{i,j}$ 表示在随机产生的初始种群中, 第 i 个个体的第 j 维变量, N_{\max}, N_{\min} 表示问题的上界和下界。基于 Logistic 映射生成初始化函数, 使相关初始解混沌化, 初始 X_0 值的范围在 0 至 1 之间随机选取, 将其依次代入(4-7)中, 产生的初始化解集即为混沌后覆盖率更广的解空间。

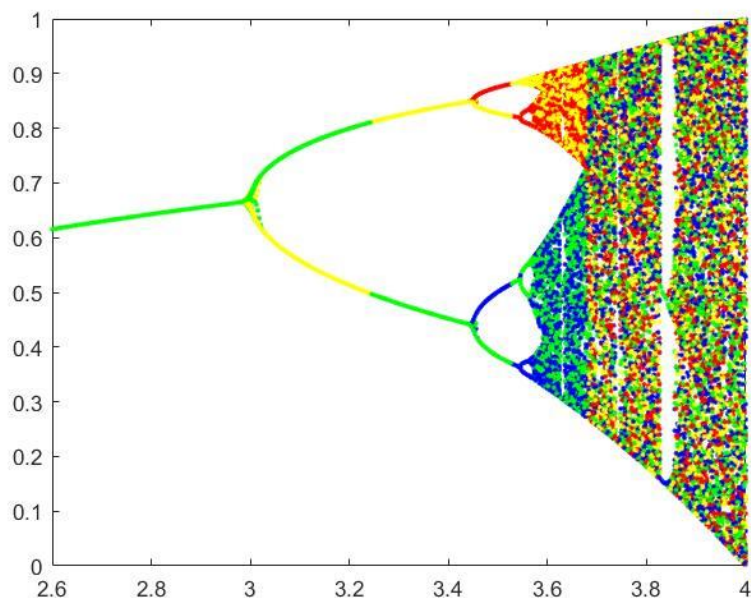


图 4-4 Logistic 映射分叉图

Fig. 4-4 Bifurcation graph of logistic map

加入混沌化的方法可以令算法初始种群的多样性增加, 但还是存在一定的弊端, 有可能无法实现解空间的全覆盖。有学者提出在搜索的过程中, 也应该考虑当前解与反向解的优劣性, 来选择更好的初始解, 这能够使算法的求解效率有很大提升。由概率论可得, 很大的可能性有一半的反向解比当前解更优, 因此在上述的混沌初始化后, 加入反向策略, 可以令初始种群的多样性更丰富。

定义 1 (反向点): 在 D 维空间中, $M = (X_1, X_2, \dots, X_D)$ 表示 D 维空间中的任意点, $X_1, X_2, \dots, X_D \in R$, $X_i \in [P_i, Q_i] \forall i \in \{1, 2, \dots, D\}$ 。则其反向点 $\tilde{M} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_D)$ 可以表示为下式。

$$\tilde{X}_i = P_i + Q_i - X_i \quad (4-8)$$

通过 4.2.1 中的适应度函数 $fitness()$, 可以对当前解和反向解的质量进行评价, $fitness$ 的数值越小, 解的质量就越好。对于种群中某个个体的当前解 M 与反向解 \tilde{M} , 倘若 $fitness(\tilde{M}) \leq fitness(M)$, 即反向解更优, 可以使用反向解替换当前解, 另外的情况则保留当前解。在加入了混沌策略和反向策略后, 极大提升了鸽群优化算法种群的多样性, 并且扩大了初始解的覆盖面, 很大程度上可以防止算法在迭代过程中陷入局部最优。

(2) 指南针算子的改进

指南针算子 R 在基本鸽群优化算法中, 对算法整体求解性能的影响非常显著, 尤其是在算法的初始阶段, 掌控着鸽群中所有个体的速度, 所以在算法后期的收敛方面, 一定程度上取决于 R 的值。通常情况下, R 的值是在 0 到 1 之间随机选取一个固定的值, 从实际意义方面看, 这种取值并不符合求解过程中实际的收敛速度。通过公式(4-9)可知, $R(k)$ 的值越小, e^{-Rk} 的值越大, $R(k)$ 的值越大, e^{-Rk} 的值越小。在算法的收敛性方面, 必须保证在前期有一定范围的搜索空间, 算法的全局搜索能力才能得到有效提升; 算法到了后期阶段必须具备快速收敛的能力, 并且能够对最优解附近进行精确的搜索。因此, 对于 R 的初始值可以小一点, 随着算法的迭代运算, 可通过下式 (4-9) 对 R 进行表示。

$$R(k) = \frac{1}{a_0 + b_0 * e^{-k}} \quad (4-9)$$

$$k = -\frac{1}{2} Nc1 + freq \quad (4-10)$$

$R(k) \in \left[0, \frac{1}{a_0}\right]$, $freq$ 表示迭代次数, 若 $a_0 = 1$, $b_0 = 100$, $Nc1 = 20$, 则 $R(k)$ 的值,

随迭代次数的变化曲线如下图所示。

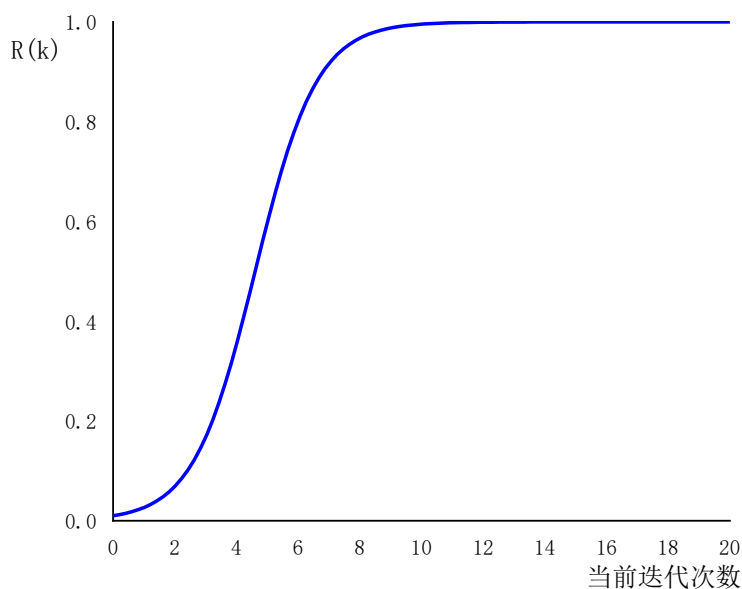


图 4-5 自适应参数 R 变化的函数曲线图

Fig. 4-5 Variation curve of adaptive parameter R

如果考虑不同鸽子个体在迭代过程中实时位置的差异性, 对适应度函数值 $fitness()$ 进行计算时, 得到的结果也会有所不同, 在指南针算子 R 中增添一个比例系数函数 T ,

通过 T 的值来体现鸽群中个体在不一样迭代次数中, 若因为适应度函数值不一样, 进而使得个体位置存在差异, 基于此来实时调整 R 的系数值, 表达式如下所示。

$$T = \frac{fitness(X_i)}{fitness(X_g)} \quad (4-11)$$

上式中 $fitness(X_i)$ 表示鸽群中第 i 只鸽子的适应度函数, $fitness(X_g)$ 表示全局最优的鸽群适应度函数, 将公式 (4-9)、(4-10)、(4-11) 代入公式 (4-1) 中, 得到新的指南针算子的更新表达式如下所示。

$$V_i(t) = V_i(t-1) * e^{-T * R(k)t} + rand * (X_g - X_i(t-1)) \quad (4-12)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (4-13)$$

在指南针算子阶段, 个体的速度与位置用公式(4-12)和公式(4-13)来进行更新。通过动态变化的指南针算子, 既能在算法的开始阶段对全局进行大范围搜索, 也能在算法后期对最优解附近进行精准的局部搜索, 改进指南针算子后的鸽群优化算法, 可以增加其本身的适应性和鲁棒性。

(3) 对算法扰动的策略

通过以上多种优化措施对鸽群优化算法进行改进后, 算法在收敛性方面、对全局的搜索能力方面、对局部的搜索能力方面, 都有了很大程度的提升, 并且已经很好的改善了算法容易陷入局部最优的情况, 但是还有一定的可能性陷入局部最优。假如在式(4-12)中, 某个体在指南针算子的迭代期间, 鸽群所在的位置已经处于全局最优位置 X_g 的附近, 那么此时若进行速度的更新, 其位置的第二项则会趋近于 0, 适应度函数值也会没有什么明显变化, 而且速度趋近于 0, 式(4-13)的位置将不会继续更新, 这种情况下也有可能造成算法求解陷入局部最优。引入柯西变异扰动和高斯扰动, 对地标算子进行改进, 可以使得算法在陷入局部最优后, 迅速跳出并继续进行计算。

柯西分布的概率密度函数表达式如下所示。

$$f(x; x_0, \gamma) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\gamma}{(x - x_0)^2 + \gamma^2} \right] \quad x \in (-\infty, +\infty) \quad (4-14)$$

上式中的 x_0 表示的是函数处于峰值位置时的横坐标, γ 代表峰值处于一半时的宽度。当 $x_0 = 0$, $\gamma = 1$ 时, 函数服从标准柯西分布, 记为 $X \sim Cauchy(0, 1)$, $Cauchy(0, 1)$ 表示的是标准柯西分布产生的随机数, 其函数图如下所示。

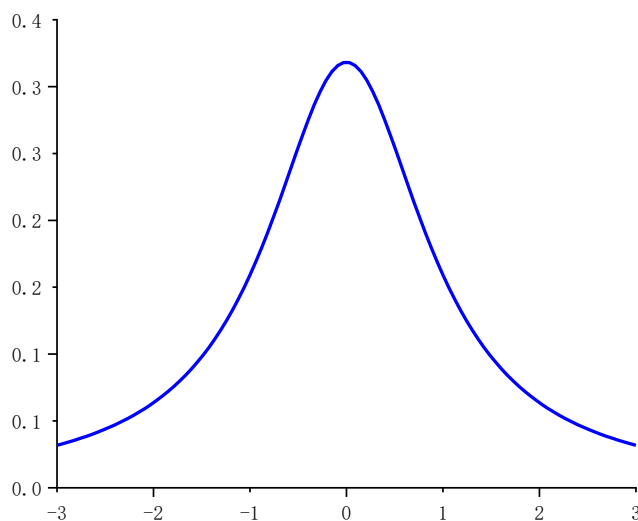


图 4-6 标准柯西概率分布的函数曲线图

Fig. 4-6 Standard Cauchy probability distribution function

引入柯西扰动后，当鸽子 i 速度近乎等于 0，同时适应度函数值保持不变，以此来判定该个体处于局部最优的情况。若算法在第 S_1 次的迭代中，临界阈值 E_1 比某个鸽子个体 i 位置变化的绝对值更大，则判定算法求解过程已经陷入局部最优。通过下式来完成位置的二次更新。

$$X_i' = X_i + \lambda * Cauchy(0,1) \quad (4-15)$$

λ 表示扰动的步长，是一个固定值。算法初始阶段鸽子的速度值是比较大的，在鸽子寻优的过程中，随着算法迭代次数的增加，鸽子的速度会呈现负相关趋势，并且趋于稳定后，进入收敛阶段。若鸽群中个体的平均速度为 0，那么种群也会在最优位置 X_g 收敛，收敛性和平均速度的整体变化趋势一样。所以，鸽群的平均速度代替式(4-16)的定值可以对步长进行干扰，并且可以在一定程度上加速鸽群的收敛速度。鸽群的平均速度 \bar{V}_i 定义式如下。

$$\bar{V}_i = \frac{\sum_{i=1}^{Np} v_{di}}{Np} \quad (4-16)$$

上式中， Np 表示种群规模数量， $\bar{V} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ ， v_{di} 表示鸽子 i 在 d 维时的速度，同时 $d \in [1, D]$ ， $i \in [1, Np]$ 。将柯西扰动后的 (4-15) 与 (4-16) 代入，得到位置二次更新的公式如下。

$$X_i' = X_i + \bar{V}_i * Cauchy(0,1) \quad (4-17)$$

在指南针算子阶段引入了柯西扰动后，该阶段进行迭代运算的鸽子若是陷入局部最优的情况，可以通过干扰迅速调整，并继续寻优，令整个鸽群可以重新找寻最优位置。鸽群优化算法在地标算子阶段，可能会出现与上述相同的情况，所以在地标算子阶段，引入高斯扰动策略进行改进。高斯分布概率密度函数的表达式如下所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (-\infty, +\infty) \quad (4-18)$$

式中，若 $\mu=0$ ， $\sigma=1$ ，则为标准的高斯分布 $N(0,1)$ 。函数曲线图如下所示。

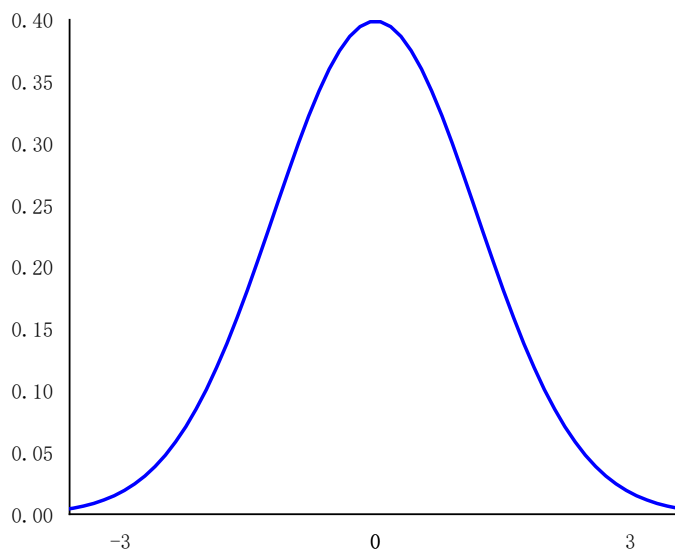


图 4-7 标准高斯概率分布的函数曲线图

Fig. 4-7 Standard Gaussian probability distribution function

与前一阶段的指南针算子类似，地标算子阶段，如果在 S_2 次迭代中，鸽子 i 的位置在变化过程中，临界阈值 E_2 比鸽子个体变化过程的绝对值更大，则判定算法求解过程已经陷入局部最优。运用高斯扰动策略进行干扰，将此时鸽子的中心位置进行更新，也与指南针算子阶段一样使用平均速度公式。最后得到改进后的鸽群中心位置二次更新公式，如下。

$$Xc'(t-1) = Xc(t-1) + \bar{V} * N(0,1) \quad (4-19)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + rand(Xc'(t-1) - X_i(t-1)) \quad (4-20)$$

通过上述改进策略对鸽群优化算法进行调整，可以使得算法收敛性有很大的提升，

在算法陷入局部最优的情况下可以迅速做出调整，算法的整体性能也有很大提升。

4.3.2 改进的鸽群优化算法步骤

本文模型涉及到两个目标函数的求解，分别是列车的总到发晚点时间最少和列车在各个车站占用的到发线费用最小。通过具体的模型分析后，对于这两个目标适合运用分层序列法进行多目标模型的求解，同时结合上述改进的鸽群优化算法，具体的算法步骤如下：

step1: 参数输入，图定列车到发时刻、列车数与车站数、列车等级权重、最小到达出发时间间隔、最小列车运行时分、起停附加时分、各站到发线数量以及占用费用、晚点情况假设等。

step2: 初始化种群数目 N_p 、个体的最大速度与最小速度 v_{\max} 、 v_{\min} 、解空间维度 D 、不同层级目标的检验数集合 Q_n 、指南针算子的最大迭代次数为 $Nc1$ 、地标算子的最大迭代次数为 $Nc2$ 、柯西扰动与高斯扰动产生的条件 S_1 、 S_2 与临界时的阈值 E_1 、 E_2 。运用 Logistic 映射公式 (4-6)、(4-7) 对初始解的适应度值 X_i 进行混沌化处理，通过公式 (4-8) 计算出初始化解 X_i 的反向点 \tilde{X}_i ，接着将两者分别代入列车运行调整目标函数中计算适应度函数值，若 $fitness(\tilde{X}_i) \leq fitness(X_i)$ ，则利用反向点 \tilde{X}_i 代替原有初始解进行接下来的计算，这种混沌-反向策略能够提高初始化解的多样性和覆盖率。

step3: 对列车运行调整目标进行计算，鸽群中的每个个体寻优路径和速度进行设置。把每只鸽子的适应度值进行对比，得到最好的飞行路径，即对正点列车顺序进行保留，对晚点列车及后续连带晚点的列车进行调整。

step4: 进入指南针算子操作。通过增加柯西扰动后的指南针算子公式 (4-12) 与 (4-13)，对每只鸽子速度与路径的更新。若迭代情况满足柯西扰动的产生条件，则运用公式 (4-15) 对个体的位置进行二次扰动，跳出局部最优。接着依据约束条件再对比鸽子的适应度值，得到较优的列车运行调整方案。

step5: 当 $Nc > Nc1$ 后，指南针算子操作中止，进入到下一步操作。否则，继续 step4。

step6: 进入地标算子操作。对已经得到的适应度值，依据公式 (4-3) 进行减半。接着依据公式 (4-4) 计算当前所求得的最优解，即最优的列车运行调整方案，若满足高斯扰动的条件，则运用公式 (4-19)、(4-20) 对解进行扰动，使其跳出局部最优解继续迭代寻优。然后，存储该最佳目标函数与相应的列车到发时刻。

step7: 当 $Nc > Nc2$ 后，地标算子操作中止，输出计算结果。否则，转到 step 6。

Step8: 验证列车运行调整目标的检验数集合 Q_1 。若均为非负，则进入下一层级的目标计算。否则，转到 step3。

Step9: 对到发线运用目标进行计算，按 step2 的方法初始化鸽群，接着对每个个体寻优路径和速度进行设置。把每只鸽子的适应度值进行对比，得到最好的飞行路径，即

对正点列车到发线运用方案进行保留,对晚点列车及后续连带晚点列车的到发线运用方案进行调整。

step 10: 进入指南针算子操作。通过增加柯西扰动后的指南针算子公式(4-12)与(4-13),对每只鸽子的速度与路径进行更新。若迭代情况满足柯西扰动的产生条件,则运用公式(4-15)对个体的位置进行二次扰动,跳出局部最优。接着依据约束条件再对比鸽子的适应度值,得到较优的到发线运用方案。

Step11: 当 $Nc > Nc1$ 后,指南针算子操作中,进入到下一步操作。否则,继续 step10。

Step12: 进入地标算子操作。对已经得到的适应度值,依据公式(4-3)进行减半。接着依据公式(4-4)计算当前所求得的最优解,即最优的到发线运用调整方案,若满足高斯扰动的条件,则运用公式(4-19)、(4-20)对解进行扰动,使其跳出局部最优解继续迭代寻优。最后,存储该最佳目标函数与相应的到发线运用调整情况。

Step13: 当 $NC > NC2max$ 后,地标算子操作中,输出计算结果。否则,转到 step 12。

Step14: 验证到发线运用目标的检验数集合 Q_2 。若均为非负,输出所有层级目标的计算结果。否则,转到 step9。

其算法流程图如下:

第四章 算法设计

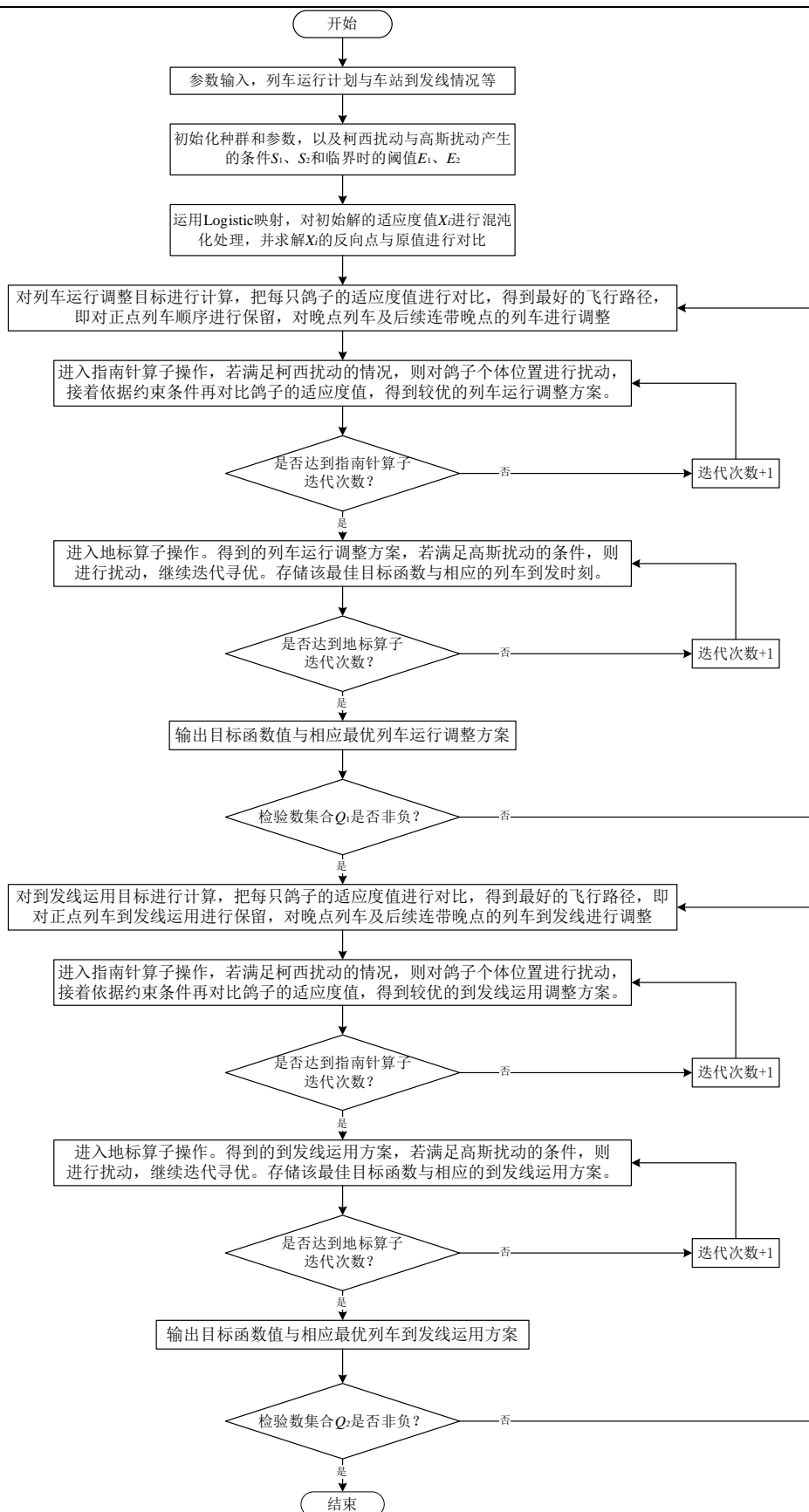


图 4-8 算法流程图

Fig. 4-8 Flow Chart of Algorithm

4.4 本章小结

本文所建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型,属于多目标规划模型,求解难度比较大。结合模型中两个求解目标的特点和实际情况,在原有鸽群优化算法的基础上加入 Logistic 映射、自适应因子、柯西分布、高斯分布,对算法进行改进,同时基于多目标规划方法中的分层序列法,设计了适用于求解本文模型的分层序列-鸽群优化算法,希望在算例中得到本文模型的满意解。

第五章 算例分析

5.1 算例情况

5.1.1 算例背景

郑西高速铁路，也被称为徐兰高速铁路郑西段，是连通河南省郑州市和陕西省西安市的重要高速铁路通道，同时也是 2016 年中长期铁路网规划中“八纵八横”高速铁路主通道之一“陆桥通道”的重要组成部分，与郑徐高速铁路、西宝高速铁路、宝兰高速铁路一同组成徐兰高速铁路。

郑西高速铁路从郑州东站到西安北站，线路的全长 523 千米，线路沿线总共 10 个车站，设计速度为 350km/h，同时在郑州枢纽和西安枢纽的内部设置了联络线，接入郑州站和西安站。郑西高速铁路是徐兰高速铁路最先开工建设、最先建成通车的一段高速铁路。郑西高速铁路同时也是全球范围内首条修建在大面积湿陷性黄土地地区的高速铁路，作为中国中西部地区第一条投入运营，且时速为 350 千米的高速铁路，郑西高速铁路全线办理客运业务的车站数为 10 个，其中，河南段 7 个、陕西段 3 个：郑州东站—郑州西站—巩义南站—洛阳龙门站—浥池南站—三门峡南站—灵宝西站—华山北站—渭南北站—西安北站，另预留临潼东站。其线路走向如下图 5-1 所示。



图 5-1 郑西高铁运行线路图

Fig. 5-1 Zhengzhou-Xi'an High-speed Railway

表 5-1 郑西高铁沿线车站情况

序号	车站名称	里程 (km)
1	郑州东站	0
2	郑州西站	42
3	巩义南站	93
4	洛阳龙门站	143
5	澠池南站	208
6	三门峡南站	266
7	灵宝西站	314
8	华山北站	402
9	渭南北站	460
10	西安北站	523

5.1.2 算例数据

(1) 列车信息

为了验证本文列车运行调整与到发线运用协同优化模型与分层序列-鸽群优化算法求解的有效性, 本文选取郑西高铁线路下行方向郑州东站至三门峡南站, 6 个站某日下午 13:00 至 19:30 的 11 列车的运行情况为研究对象^[59]。为计算表达方便, 郑州东站至三门峡南站分别表示为: 车站 1、车站 2、车站 3、车站 4、车站 5、车站 6, 11 列列车车次表示为 1 至 11。将列车速度等级分为一级、二级、三级, 对应的列车权重 $\varphi(i_m)$ 为 3、2、1。列车车次的等级为 [1 1 1 1 3 3 3 3 2 2 2], 相应列车等级权重为 [3 3 3 3 1 1 1 1 2 2 2]。列车的起停附加时分分为 2min 和 1min, 不同等级列车在各个区间的最小运行时分的最小作业时间, 以及列车图定的运行时间表如下所示。

表 5-2 列车区间最小运行时分和最小作业时间表

区间	等级 1	等级 2	等级 3	车站	等级 1	等级 2	等级 3
1	20	36	24	1	3	4	3
2	25	48	30	2	0	0	0
3	29	40	38	3	0	0	0
4	10	23	21	4	2	4	3
5	25	44	42	5	0	0	0
				6	2	3	2

表 5-3 列车图定运行时间

车次 车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

续表

1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:00	14:10	14:20	14:30	15:10	15:20	15:30
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:08	14:18	14:28	14:38	15:16	15:26	15:36
2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:30	15:48	15:58	16:07	16:17	16:27	16:37
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:38	15:48	15:58	16:41	16:17	16:27	16:37
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:26	17:02	17:10	17:18
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:34	17:08	17:16	17:24
5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:00	17:36	17:42	17:50
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:36	17:42	17:50
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

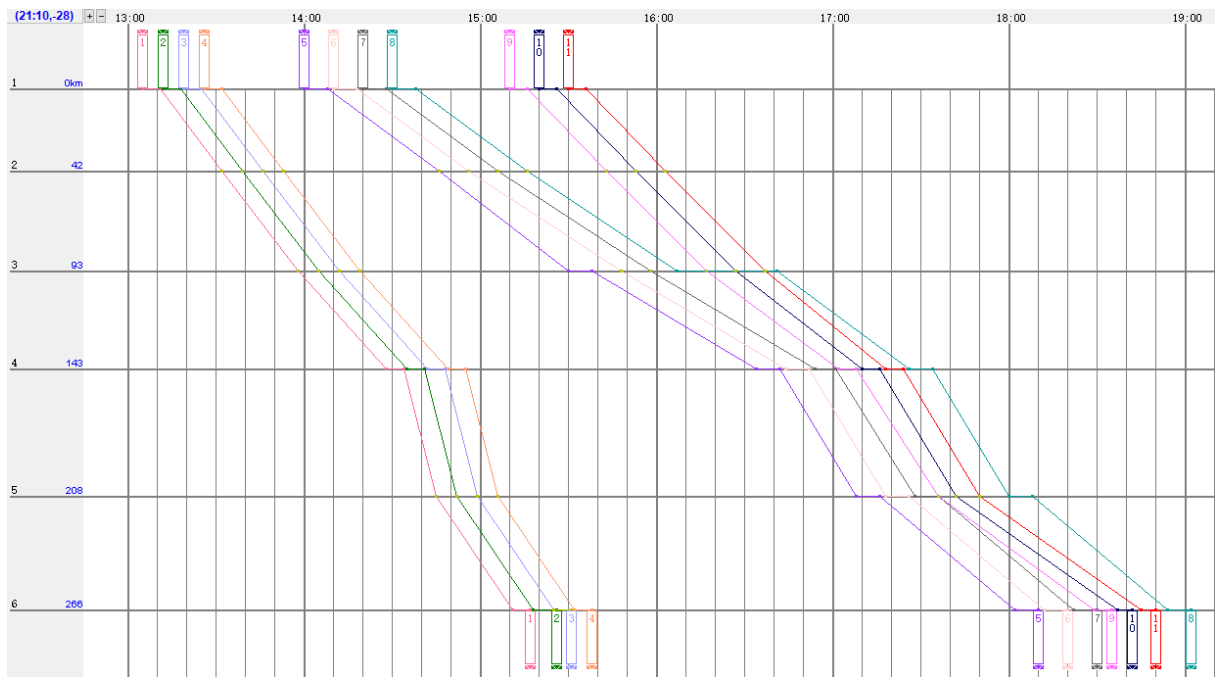


图 5-2 原列车运行图

Fig. 5-2 Original train diagram

(2) 车站信息

下行方向六个站的到发线数量分别为 3 条、3 条、3 条、2 条、2 条、3 条，各站到发线集合为 $K_1, K_2 \dots K_6$ ，如 $K_1 = \{l_1, l_2, l_3\}$ 且有 3 条到发线的车站中，到发线 l_3 是占用费用权重为 100。

表 5-4 原到发线运用情况

车次 车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	l_1	-	-	l_1	-	-	-
4	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
5	-	-	-	-	l_1	l_1	l_1	l_1	-	-	-
6	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1

5.2 算法参数设置

本小节基于模型特点对初始的鸽群优化算法参数进行优先设置，建立基于列车运行计划的二维仿真计算实验。列车运行调整约束条件与到发线运用约束条件根据第三章的模型建立与实际的列车运行情况进行界定，算法的参数设置情况如下表所示。

表 5-5 算法参数情况表

符号	参数定义	取值
$Nc1$	指南针算子的最大迭代次数	5
$Nc2$	地标算子的最大迭代次数	15
Nc_{max}	鸽群优化算法的最大迭代次数	20
R	指南针因子	0.2
γ	柯西变异尺度函数	1
Np	鸽群中的个体数量	30
D	维度	2
a_0	混沌初始化参数	1
b_0	混沌初始化参数	100
S_1	柯西扰动条件	3
S_2	高斯扰动条件	3
E_1	柯西扰动阈值	0.2
E_2	高斯扰动阈值	0.1

5.3 不同晚点情况的调整优化结果

结合文献中的三种假设晚点情况，进行实验计算，同时增加三种晚点都发生的大面

积晚点情况进行计算分析。采用仿真实验平台为 Windows 7, Matlab 2019a, CPU 为 Intel(R) Core(TM)i7-4790 Cpu @3.60GHz, 内存为 8.0GB 的电脑。具体的晚点情况假设为: 车次 5 在车站 1 晚点 10 分钟、车次 9 在车站 1 晚点 15 分钟、车次 8 在车站 3 晚点 30 分钟。

5.3.1 晚点情况一的优化结果

第一种晚点情况, 车次 5 在车站 1 到达时间晚点 10 分钟。经过算法调整, 得到的列车运行时刻表与算法迭代图如下所示。

表 5-6 第一种晚点情况调整后的列车运行时刻表

车次 车站		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:10	14:14	14:20	14:30	15:10	15:20	15:30
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:17	14:21	14:28	14:38	15:16	15:26	15:36
2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:07	16:17	16:27	16:37
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:41	16:17	16:27	16:37
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:26	17:02	17:10	17:18
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:34	17:08	17:16	17:24
5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:00	17:36	17:42	17:50
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:36	17:42	17:50
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

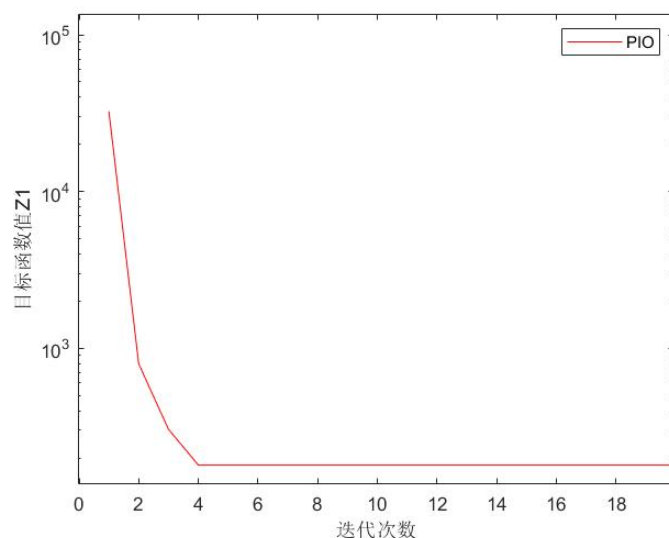


图 5-3 第一种晚点情况下目标 Z_1 的算法收敛曲线图

Fig.5-3 Convergence curve of Z_1 algorithm in the first case of delay

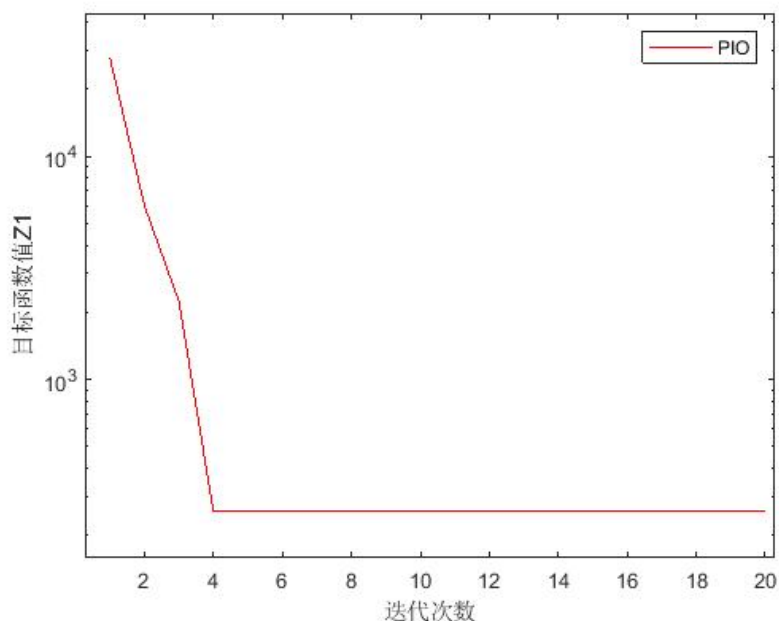
列车运行调整后，加快了列车区间运行速度与压缩列车停站时分。最后得到目标函数值为 Z_1 为 56，总到发晚点时间为 56 分钟，列车在第 4 站恢复为图定运行时间，同时造成车次 6 在第 1 站晚点 4 分钟、第 2 站晚点 1 分钟。通过改进的鸽群优化算法进行寻优，仅 5 次便求得最优的运行调整方案。

5.3.2 晚点情况二的优化结果

第二种晚点情况，车次 9 在车站 1 到达时间晚点 15 分钟。经过算法调整，得到的列车运行时刻表与算法迭代图如下所示。

表 5-7 第二种晚点情况调整后的列车运行时刻表

车次 车站		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:00	14:10	14:20	14:30	15:25	15:29	15:33
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:08	14:18	14:28	14:38	15:31	15:35	15:39
2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:30	15:48	15:58	16:07	16:25	16:29	16:37
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:38	15:48	15:58	16:41	16:25	16:29	16:37
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:26	17:03	17:10	17:18
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:34	17:09	17:16	17:24
5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:00	17:36	17:42	17:50
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:36	17:42	17:50
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	19:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

图 5-4 第二种晚点情况下目标 Z_1 的算法收敛曲线图Fig.5-4 Convergence curve of Z_1 algorithm in the Second case of delay

列车运行调整后，加快了列车区间运行速度与压缩列车停站时分。最后得到目标函数值为 Z_1 为 214，总到发晚点时间为 107 分钟，列车在第 5 站恢复为图定运行时间，同时造成车次 10 与 11 的连带晚点，车次 10 在第 4 站恢复正点，车次 11 在第 2 站恢复正点。通过改进的鸽群优化算法进行寻优，也是仅 5 次便求得最优的运行调整方案。

5.3.3 晚点情况三的优化结果

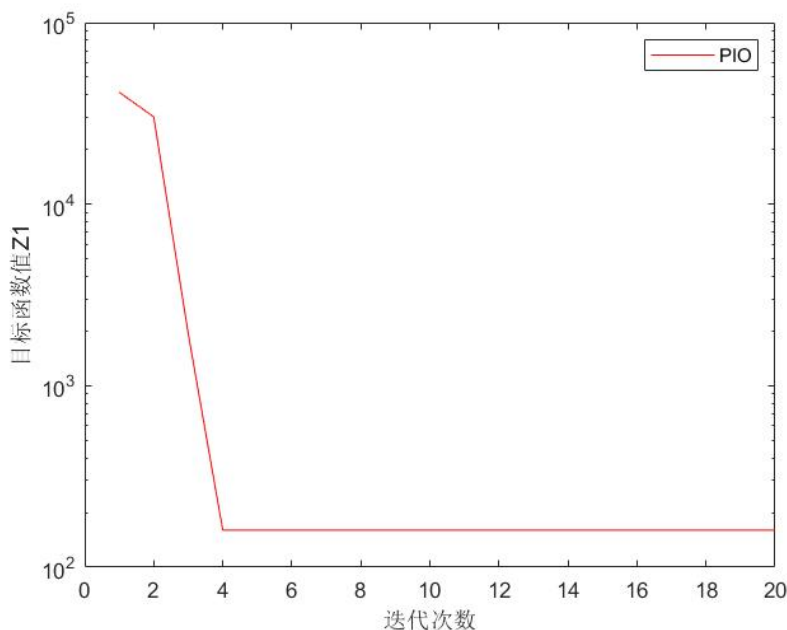
第三种晚点情况，车次 8 在车站 3 到达时间晚点 30 分钟。经过调整，得到的列车运行时刻表与算法迭代图如下所示。

表 5-8 第三种晚点情况调整后的列车运行时刻表

车次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
车站												
1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:00	14:10	14:20	14:30	15:10	15:20	15:30
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:08	14:18	14:28	14:38	15:16	15:26	15:36
2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:46	14:56	15:06	15:16	15:43	15:53	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:30	15:48	15:58	16:41	16:17	16:27	16:37
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:38	15:48	15:58	16:53	16:17	16:27	16:37
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:33	17:02	17:10	17:18
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:40	17:08	17:16	17:24

续表

5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:03	17:36	17:42	17:50
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:36	17:42	17:50
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

图 5-5 第三种晚点情况下目标 Z_1 的算法收敛曲线图Fig. 5-5 Convergence curve of Z_1 algorithm in the Third case of delay

列车运行调整后，加快了列车区间运行速度与压缩列车停站时分，并发生了越行的情况。最后得到目标函数值为 Z_1 为 144，总到发晚点时间为 72 分钟，车次 8 在第 6 站恢复为图定运行时间，由于后续车次 9、10 和 11 的车次等级都比车次 8 更高。经模型调整和算法寻优后均在满足越行条件的基础上对车次 8 进行了越行。这种情况下，仅车次 8 这一列车发生晚点，同时也仅 5 次便求得最优的运行调整方案。

5.3.4 晚点情况四的优化结果

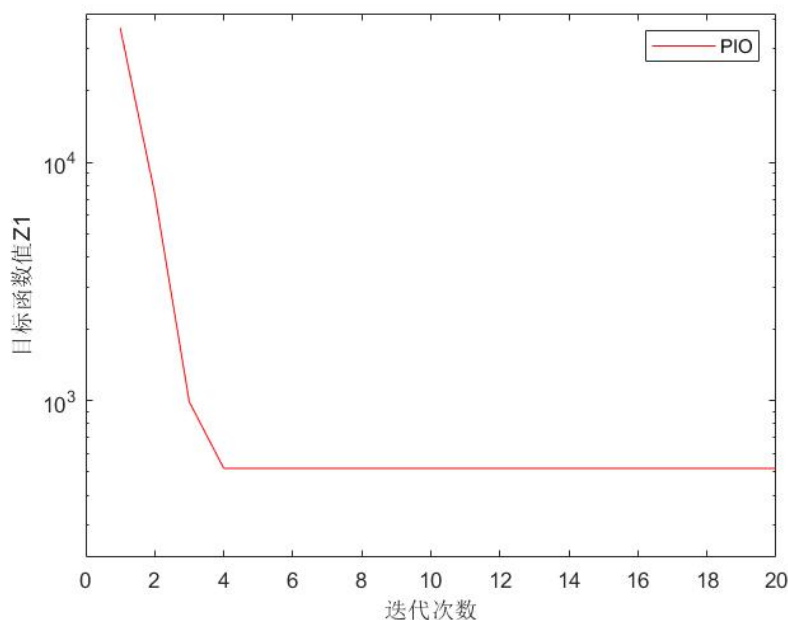
假设发生大面积晚点的情况，上述三种晚点假设情况均发生，车次 5 在车站 1 晚点 10 分钟、车次 9 在车站 1 晚点 15 分钟、车次 8 在车站 3 晚点 30 分钟。调整后的列车运行时刻表与算法迭代图如下所示。

表 5-9 三种晚点情况都发生调整后的列车运行时刻表

车次 车站		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:10	14:14	14:20	14:30	15:25	15:29	15:33
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:17	14:21	14:28	14:38	15:31	15:35	15:39

续表

2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:37	16:41	16:45	16:49
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:53	16:41	16:45	16:49
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:33	17:19	17:23	17:27
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:40	17:25	17:29	17:33
5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:03	17:46	17:50	17:54
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:46	17:50	17:54
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

图 5-6 三种晚点都发生的情况下目标 Z_1 的算法收敛曲线图Fig. 5-6 The convergence curve of target Z_1 algorithm occurs in all three late cases

在大面积晚点的情况下，车次 5 在第 1 站发车时间晚点 10 分钟，由于与后两种晚点情况的间隔时间较长没有发生晚点情况的相互干扰，恢复正点与晚点传播情况与晚点情况一中的优化结果一致；车次 9 在第 1 站发车晚点 15 分钟与车次 8 在第 3 站发车晚点 30 分钟，这两种情况发生时间接近，产生相互干扰的情况，除了导致自身车次晚点时间延长，还导致车次 10 的连带晚点时间延长。通过模型算法进行运行调整后得到的目标函数值 Z_1 为 512，晚点车次 5、6、9、10、11 加起来的总到发晚点时间为 394 分钟。车次 5 在第 4 站恢复正点运行，车次 6 在第 3 站恢复正点，车次 8、9、10 在第 6 站恢复正点，车次 11 在第 2 站恢复正点。

5.3.5 到发线运用调整结果

对于目标函数 Z_2 到发线占用费用最小, 晚点情况一至四的到发线运用变更情况与算法迭代图, 如下所示。

表 5-10 到发线运用变更情况

晚点情况	车次 车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		一	1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_2	l_1	l_1	l_1
2	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-		-	-	-	l_1	-	-	l_1	-	-	-
4	l_1		l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
5	-		-	-	-	l_1	l_1	l_1	l_1	-	-	-
6	l_1		l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
二	1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_2	l_2
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	l_1	-	-	l_1	-	-	-
	4	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
	5	-	-	-	-	l_1	l_1	l_1	l_1	-	-	-
	6	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
三	1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	l_1	-	-	l_1	-	-	-
	4	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
	5	-	-	-	-	l_1	l_1	l_1	l_1	-	-	-
	6	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
四	1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_2	l_1	l_1	l_1	l_2	l_2
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	l_1	-	-	l_1	-	-	-
	4	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1
	5	-	-	-	-	l_1	l_1	l_1	l_1	-	-	-
	6	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1	l_1

表 5-11 不同晚点情况下到发线运用方案调整情况汇总

晚点情况	晚点影响车次	到发线运用方案变更情况	原方案目标 Z_2 的值	调整后 Z_2 的值
------	--------	-------------	----------------	--------------

第一种晚点情况	5、6	车次 6 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2	71	71
第二种晚点情况	9、10、11	车次 10、11 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2	71	71
第三种晚点情况	8	不变	71	71
三种情况都发生	5、6、8、9、10、11	车次 6 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2 ; 车次 10、11 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2	71	71

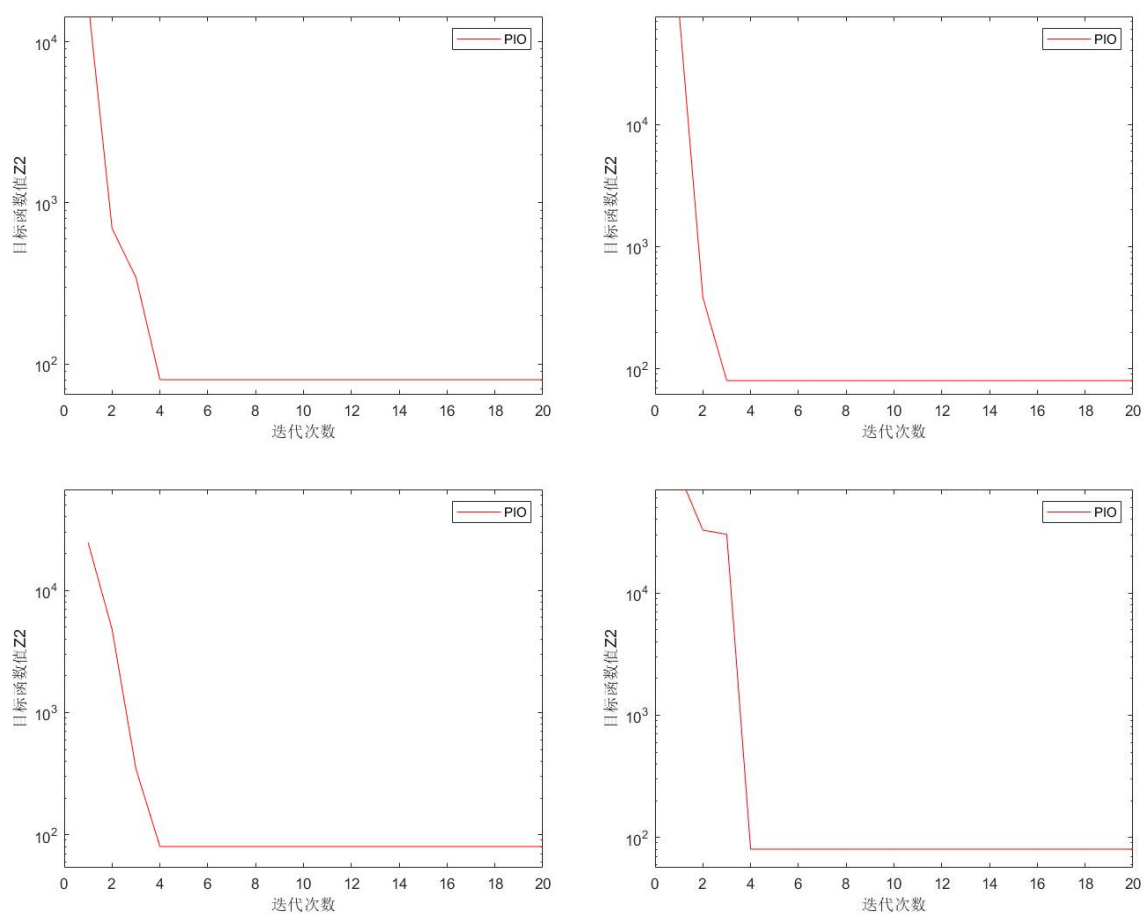


图 5-6 四种晚点情况目标 Z2 算法收敛曲线图

Fig. 5-6 The convergence curve of target Z1 algorithm occurs in all three late cases

在到发线运用方面, 假设的四种晚点情况, 模型调整方案后的列车占用到发线的总费用 Z_2 的值均为 71。晚点情况一车次 6 在车站 1, 到发线运用由 l_1 变更至 l_2 ; 晚点情况二车次 10、11 在车站 1, 到发线运用由 l_1 变更至 l_2 ; 晚点情况三到发线运用方案不变; 晚点情况四车次 6 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2 ; 车次 10、11 在车站 1, 到发线由 l_1 变更至 l_2 。改进的鸽群优化算法在求解目标 Z_2 时迭代次数均为 4 次左右。若现实中出现需要变更到发线, 依据调度人员的主观判断调整, 该值则可能会偏大。所以得到的到

发线运用协同优化结果,在实际生产调度方面具有一定的借鉴意义。

5.4 本章小结

本章运用郑西高铁线路中部分的图定列车运行计划和到发线运用情况,对本文所建立的列车运行调整与到发线运用协同优化模型和分层序列-鸽群优化算法进行算例的计算验证。假设了四种晚点情况,均得到了优化调整后的列车运行时刻表和到发线运用方案变更情况,实现了列车运行调整总到发晚点时间与到发线占用费用的求解优化。本章优化的结果,为遇到突发晚点后,实际列车和车站的调度决策,提供了一定的借鉴作用。

第六章 结论与展望

现今我国铁路运输业的发展已经进入了大发展的黄金时期,如何对铁路的运输组织工作进行优化是重中之重。合理的对整体列车流进行运行调整的同时,考虑各车站内的到发线运用,可以同时提高列车运行的效率和车站作业的效率。本文对现阶段的国内外研究现状进行了分析,在现有研究的基础上建立了列车运行调整与到发线运用的协同优化模型,然后通过模型分析,运用分层序列法的思想并结合鸽群优化算法,对算例进行求解,得到了优化调整后的列车运行时刻表和到发线运用方案变更情况。

6.1 主要工作内容与结论

本文考虑了宏观层面的列车流运行调整与微观层面的列车在车站的到发线运用调整,以列车的总到发晚点时间最少和到发线的占用总费用最小为目标,构建了列车运行调整与到发线运用的协同优化模型,结合分层序列法的思想并运用改进的鸽群优化算法进行求解,得到突发晚点条件下的列车运行调整计划和到发线运用变更情况,全文重点在于模型的构建与相关算法的求解。具体如下:

(1) 从列车运行调整和到发线运用两个方面,总结分析了国内外研究现状,引出本文的主要研究内容,构建全文的主题框架。对列车运行图的概念与基本要素进行概述,分析列车在运行调整中的晚点影响因素、晚点情况,以及运行调整的方式与结果评价;阐述到发线运用的相关要素、调整方式、车站内部作业过程、咽喉区与到发线占用时间标准,最后梳理了列车运行调整与到发线运用两者的相关性。

(2) 考虑宏观层面的列车流运行调整与微观层面的到发线运用调整,以总到发晚点时间最少和到发线占用费用最小为优化目标,考虑列车运行调整中的最小到发时间间隔、区间最小运行时分、最小停站时间等约束;到发线运用中的接发车唯一性、到发线选择唯一性、到发线被占用约束等约束。建立列车运行调整与到发线运用的协同优化模型,对模型特点进行分析,结合多目标规划问题的求解特性,提出结合分层序列法对模型进行求解。以鸽群优化算法为基础,根据算法特点引入 Logistic 映射、自适应因子、柯西分布、高斯分布,对算法进行改进。设计了一种适用于求解本文列车运行调整与到发线运用协同优化模型的分层序列-鸽群优化算法,对模型进行求解。

(3) 以郑西高铁线路的一段为例,假设了四种晚点情况,根据所建模型,运用设计的鸽群优化算法进行求解,得到了四种晚点情况优化调整后的列车运行调整时刻表和到发线运用的变更情况,验证了模型与算法的有效性。

(4) 通过以上研究得出结论:本文所建立的列车运行调整与到发线协同优化模型与求解算法,在实例运用方面具备一定的适用性,能为铁路管理部门处理突发列车晚点

事件的决策提供借鉴。

6.2 论文创新点

本文在目前研究的基础上进行了一定程度的创新，具体有如下几点：

(1) 国内外学者现有的研究，大多仅针对列车运行调整问题或到发线运用问题进行单方面的研究。或者在考虑到发线运用问题上，仅涉及了车站能力方面的到发线数量问题，鲜有对列车运行调整与到发线运用的协同优化问题的研究，本文在这方面研究较为不足的基础上建立了列车运行调整与到发线运用的协同优化模型，并提出运用分层序列法的思想对模型的目标进行求解。

(2) 在求解算法部分，结合现阶段算法求解具有一定的局限性，本文提出运用鸽群优化算法对模型进行求解。将基础的鸽群优化算法进行了改进，运用 Logistic 映射、自适应因子、柯西分布和高斯分布，对算法的初始解和算子进行改进，使对算法的求解性能更优。

(3) 此前研究在晚点情况考虑方面，大多仅考虑单车次在车站的晚点情况，本文基于实际情况，还考虑了大面积的多车次晚点情况的运行调整，并在算例中对假设的多晚点情况进行了求解。

6.3 研究展望

本文对列车运行调整与到发线运用协同优化问题进行了初步研究，取得了一些成果，但是仍有很多不足，今后还需要进一步研究的方向有：

(1) 本文在模型的研究过程中，仅对铁路运输企业的调度决策方面进行了优化研究，列车运行调整与到发线运用基本都是按照企业层面的角度考虑，这一点可能会增加旅客的出行成本，同时降低旅客的出行满意度。以后可以适当加入旅客层面的量化指标，纳入到模型的约束与目标中。

(2) 本文对于列车在车站的到发线运用问题仅考虑了停站通过的情况，并没有综合考虑车站内的其他情况。今后的研究还可以综合考虑车站的其它情况，增加相关约束，建立更加完备的协同优化模型。

(3) 本文研究对象是单一方向的列车流，今后还需进一步对双线列车流，甚至网络化的运行调整与到发线运用协同优化问题进行研究，分析不同层面的列车与车站决策所带来的变化。

参考文献

- [1] Szpigel B . Optimal train scheduling on a single track railway[J]. Operations Research, 1972, 72:343-352.
- [2] Sauder R L , Westerman W M . Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization[J]. Interfaces, 1983, 13(6):24-37.
- [3] Araya S , Abe K , Fukumori K . An optimal rescheduling for online train traffic control in disturbed situations[C]// Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on. IEEE, 1984.
- [4] Cury J E , Gomide F A C , Mendes M J . A methodology for generation of optimal schedules for an underground railway system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(2):217-222.
- [5] 查伟雄, 陈治亚, 李夏苗. 复线列车运行调整理论与方法的研究[J]. 铁道学报, 2000(01):12-16.
- [6] 史峰, 黎新华, 秦进, 邓连波. 单线列车运行图铺划的时间循环迭代优化方法[J]. 铁道学报, 2005(01):1-5.
- [7] 章优仕, 金炜东. 单线列车运行调整目标体系与算法模型的研究[J]. 东南大学学报:自然科学版. 2009(S1):248-254.
- [8] 孟令云, 杨肇夏, 李海鹰. 单线铁路区间能力失效条件下列车运行调整模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4):885-885.
- [9] 曾壹, 张琦, 陈峰. 基于约束规划方法的高速铁路调整优化模型[J]. 铁道学报, 2019, 41(04):1-9.
- [10] 高如虎, 牛惠民, 江雨星. 基于多维网络的增开列车条件下高速铁路列车运行图调整[J]. 铁道学报, 2020, 42(05):1-8.
- [11] 龙思慧, 孟令云, 王义惠, 栾晓洁, 张鹏. 高速列车运行调整与运行控制一体化双目标优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(06):163-169.
- [12] 徐培娟, 张大伟, 彭辉, 刘丹. 多类干扰下的高铁列车运行调整优化模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(07):1723-1731.
- [13] Xiaoming Xu, Keping Li, Lixing Yang, Jingjing Ye. Balanced train timetabling on a single-line railway with optimized velocity[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(3).
- [14] Yusin Lee, Li-Sin Lu, Mei-Ling Wu, Dung-Ying Lin. Balance of efficiency and robustness in passenger railway timetables[J]. Transportation Research Part B, 2017, 97.
- [15] Jin Liu, Lei Chen, Clive Roberts, Gemma Nicholson, Bo Ai. Algorithm and peer-to-peer negotiation strategies for train dispatching problems in railway bottleneck sections[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(11).
- [16] 段少楠. 基于离散萤火虫算法的高速列车运行调整问题研究[D]. 北京交通大学, 2018.
- [17] 牛晋财, 李茂青, 张雁鹏. 基于人工鱼群算法的列车运行调整方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(07):259-264+270.
- [18] 李晓娟, 闫振英, 韩宝明. 基于多叉树的延误高速列车运行优化调整方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(02):130-136.
- [19] 冉江亮, 韩宝明, 李得伟, 郑玢. 突发事件下高速铁路列车运行调整研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(04):128-134.
- [20] 查伟雄, 张子悦, 严利鑫. 客货混行条件下列车运行调整模型及算法[J]. 北京交通大学学

- 报, 2020, 44(06):59-65.
- [21] 户佐安,夏一鸣,蔡佳,薛锋. 延误条件下综合多种策略的城轨列车运行调整优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(05):1664-1672.
- [22] Egidio Quaglietta, Meng Wang,Rob.M.P.Goverde.A multi-state train-following model for the analysis Of virtual coupling railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management,2020,15(prepublish).
- [23] Masoud Shakibayifar, Abdorreza Shcikholeslami.Amin Jamili.A Multi-Objective Decision Support System for Real-Time Train Rescheduling.[J].IEEE Intell.Transport.Syst. Mag.,2018,10(3).
- [24] Xiaoming Xu, Keping Li, Lixing Yang,Zivou Gao.An efficient train scheduling algorithm on a single-track railway system[J]. Journal of Scheduling,2019,22(1).
- [25] 朱子轩,鲁工圆,何必胜,彭其渊. 单线铁路网络列车运行智能调度仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(05):194-201.
- [26] 张正坤,朱昌锋,马文虎. 离散视角下单线铁路列车运行调整优化[J]. 交通信息与安, 2021, 39(04):108-116.
- [27] 吉祥雨. 全自动运行系统列车运行调整方法及仿真分析[D]. 北京交通大学, 2020.
- [28] 张艺琳. 面向信号系统故障的城市轨道交通列车运行调整及评价仿真研究[D]. 深圳大学, 2020.
- [29] 张永光. 基于虚拟现实的高速列车运行优化及仿真验证研究[D]. 北京交通大学, 2020.
- [30] 李和壁. 高速铁路列车群运行仿真系统技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2021.
- [31] 谭畅,李毅清,杨辉. 存在扰动和时滞的高速列车自适应制动控制[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(04):64-71+126.
- [32] Carey M,Carville S.Scheduling and platforming trains at busy complex stations[J].Transportation Research Part A,2003,37(3):195-224.
- [33] Partha Chakroborty, Durgesh Vikram. Optimum assignment of trans to platforms under partial schedule compliance[J].Transportation Research Part B,2007,42(2).
- [34] Corman F , Andrea D'Ariano, Pacciarelli D , et al. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(1):0-192.
- [35] Baoshan WANG,HouLixin,Haidong LIU. Optimized Utilization ot Arrival and Departure Tracks in Dedicated Passenger Lines[J]. Journal of Transportation Systems Engneering and InformationTechnology,2012,12(2).
- [36] RuiJun Qiao, Xiao Ning Zhu, Wei Yan.Optimized Utilization of Station Arrival and Departure Tracks for Passenger Dedicated Lines[J].Advanced Materials Research,2012,1670.
- [37] 赵茜茜,张琦. 基于同站台换乘的高铁车站作业计划优化编制[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(01):20-27.
- [38] 刘伟,朱晓宁,李燕晶. 列车到发不确定的客站咽喉利用与股道分配[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(01):14-19.
- [39] 刘杰,殷勇,甘志良. 高速铁路车站咽喉区与到发线综合运用优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(01):193-199.
- [40] 彭其渊,宁佳,鲁工圆. 大型高铁客运站到发线运用调整模型及算法[J]. 铁道学报, 2019, 41(01):10-19.
- [41] 彭其渊,张永祥,鲁工圆,李文新,石铁. 基于时空资源的铁路客运站到发线运用调整[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(07):1011-1021.

- [42] 李涛,张杉基,孙建林,张杨,贾飞. 基于改进遗传算法的客运站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(06):30-37.
- [43] 任禹谋,张琦,袁志明,周晓昭. 基于滚动时域优化的高速铁路车站到发线动态调整研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(02):96-102.
- [44] 任禹谋,张琦,袁志明,孙延浩. 安全约束条件下高铁站到发线运用优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(01):179-185.
- [45] 任禹谋,张琦,袁志明,王涛,丁舒忻,李智. 基于列车到发分布的高速铁路车站到发线运用优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(08):137-143.
- [46] 郎越. 高速铁路大站咽喉区与到发线综合优化模型及算法研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2021.
- [47] Hackwood S, Beni G. Self-organization of Sensors for Swarm Intelligence. The 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, IEEE,1992:819-829.
- [48] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System. A adaptation in natural and Artificial System. MIT Press,1992.
- [49] Kennedy. J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, IEEE,1995:1942-1948.
- [50] Dorigo M, Maniezzo M, Colorin V. A Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Transactions on SMC, 1996, 26(1):8-41.
- [51] Karaboga D, Basturk B. A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [52] YANG X S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Beckington, Luniver Press, 2008.
- [53] Duan H, Qiao P. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. International Journal of Intelligent Computing & Cybernetics, 2014, 7(1):24-37.
- [54] 王吉岱,王新栋,田群宏,孙爱芹,张新超,袁亮. 基于改进模糊自适应遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 机床与液压, 2021, 49(23):18-23.
- [55] Sabyasachi M, Antonios T. Two-Dimensional Quantum Genetic Algorithm: Application to Task Allocation Problem. Sensors, 2021, 21(4):1251-1251
- [56] Yan C M, LU Genyuan, LIU Yingting. et al. A modified PSo algorithm with exponential decay weight [C]// Proceedings of 2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Changan, IEEE, 2018:239-242
- [57] Zhan Z H, Zhang J, Li Y. Adaptive Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2009, 39(6):1361-1381
- [58] 黄江平,程绍榕. 改进粒子群算法的轨道列车节能控制优化[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(02):56-63.
- [59] 豆雯雯. 基于免疫蚁群算法的列车运行调整模型的优化研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2012:40-45.
- [60] 王佳,王博. 基于改进蚁群算法和 Mann-Kendall 法的涡桨发动机性能预测[J/OL]. 航空动力学报:1-8[2022-01-13].
- [61] 刘二根,谭茹涵,陈艺琳,郭力. 基于改进人工蚁群的智能巡线机器人路径规划[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(06):103-107.
- [62] Shuang Y U, Ding L, Hong-Tao W U. Path Planning for UAVs Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2017.

参考文献

- [63] 吴钰晗, 梁晓丹. 基于约束相容策略的人工蜂群算法. 计算机科学与应用. 2020, 10(11):2034-2048
- [64] 王辉, 吕兴顺. 一种改进的萤火虫算法及在洗出优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(02):306-314.
- [65] Gandomi AH, Alavi AH. Krill Herd: A New Bio-inspired Optimization Algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(12):4831-4845.
- [66] 郭瑞. 鸽群优化算法及其应用研究[D]. 广西民族大学, 2017.
- [67] 段海滨, 邱华鑫, 范彦铭. 基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(06):559-572.

个人简历 在读期间发表的学术论文

个人简历:

王宇晴, 男, 1997年6月生。

2019年7月, 毕业于华东交通大学软件工程(+交通运输)专业, 获工学学士学位。

2019年9月, 考入华东交通大学攻读交通运输工程硕士。

待发表论文:

[1] 王宇晴, 查伟雄, 万平. 列车运行调整与到发线运用的协同优化研究[J]. 科学技术与工程. (中文核心, 已录用)

[2] 王宇晴, 查伟雄, 万平, 季华伟. 轨道交通网络化的应急公交驻车点选址研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版). (中文核心, 已录用)

获得奖项:

2019年, 华东交通大学研究生学术英语词汇竞赛三等奖

2019年, 全国高校创新英语挑战赛优秀奖

2020年, 江西省研究生数学建模竞赛二等奖

2021年, 江西省研究生数学建模竞赛一等奖

“华为杯”第十七届中国研究生数学建模竞赛三等奖

2019-2020学年, 获江西省研究生校级一等奖学金

2020-2021学年, 获江西省研究生省级学业奖学金

2021-2022学年, 获江西省研究生省级学业奖学金

参与课题:

[1] 南昌市桃花南路快速化改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

[2] 南昌市轨道交通2号线东延工程施工期间交通组织方案设计, 主要参与人员

[3] 南昌市南斯友好路综合改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

[4] 南昌市九洲高架东延工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

[5] 南昌市方正苑交通影响评价方案, 主要参与人员

[6] 南昌市2019年都市公交第三方专项调查, 主要参与人员

[7] 南昌市象山路-叠山路综合改造提升工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

[8] 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

[9] 南昌市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

[10] 南昌市西一环(枫生快速路段)、北一环(英雄大桥)货车限行方案可行性分析, 主要参与人员

[11] 南昌市轨道交通1号线北延工程施工期间交通组织方案设计, 主要参与人员

[12] 南昌市新建区城镇雨污水管网及市政管网分流改造工程施工期间交通组织方案, 主要参与人员

[13] 江西省余干县智慧交通建设项目(VISSIM交通仿真), 主要参与人员

致谢

值此之际，脑海中突然浮现出一阵熟悉的经典歌曲《往事只能回味》，时光一逝永不回，往事只能去回味……我三年的花椒研究生生涯即将结束，同时也是我七年花椒学习生涯的结束，我怀揣着无法言语的感动对这些年给予我帮助与鼓励的人，致以最真挚的感谢。

首先最要感谢的就是我的导师——查伟雄。查伟雄老师作为学院交通运输专业的学科带头人，平时除了教学工作，还作为专家参与了大量的南昌市甚至是江西省的发展建设项目，为整个南昌整个江西的交通事业都尽心竭力。他在学识上非常渊博，无论从专业素养还是文学素养上，都是实验室上下学习的榜样，文章能够的顺利完成也得益于他的精心指导，从确定研究方向到开题，再到论文完稿，其中都倾注了查老师的心血。他不仅在学习上对我们细心指导，在平时的生活方面也对我们百般关怀，不仅在我们遇到困难时鼓励我们，在找工作时也热情地为我们出谋划策。正是因为他这三年在耳边的谆谆教诲，让我三年的研究生时光充满了乐趣，在学习到很多交通运输专业知识和技能的同时，也学习到了他为人处世谦卑的风格和态度。

除了感谢查老师外，还要感谢研究所三位给予过我很多帮助的博士老师——李剑老师、闫云娟老师和易晨阳老师。李剑老师作为我们研究所的博士大师兄，可以说是非常的平易近人，能够跟我们打成一片，每次跟李剑老师交流项目和学术方面的问题，都能有不一样的收获。闫云娟老师和易晨阳老师虽然不经常待在研究所，但是每每在研究所或是学校遇见都会对我们嘘寒问暖、询问近况，向她们请教问题，她们也都十分认真专注的为我们提供帮助。

当然，我还要感谢我的同门季华伟、任逸飞，从研一到研三我们组成的“机车三兄弟战队”在每次数学建模竞赛中所向披靡，都取得了不错的成绩，学习生活上也都是相互鼓励、相互进步。感谢我的室友洪振文、弓永太、闵忠兵以及研究生班上的其他同学，是他们丰富了我这三年的寝室生活并给予我鼓励支持，感谢已经毕业的师兄奚宽响、冯涛，师姐段凌林、郑开娣、张子悦、蔡其燕，现在的师弟谢贤亮、舒伟成、程皓琨、王安东，师妹周佳宇、高金哲、杨思思、颜雪柯，跟他们一起在研究所有很多的欢声笑语，无论有什么事都是其乐融融。

最后，我要感谢我的父母，他们在我学业上始终是无条件的支持，正是因为他们支持，让我能够无忧无虑的专注学习，完成学业。感谢肖泽琳同学，这么多年我们生活上相互帮助，学习上相互鼓励，情感上相互倾诉，因为有了她的陪伴，让我心智逐渐成熟变得能够独当一面。

还有太多的感动都无法表达，但愿时光不负，岁月可期！