

考虑效能的高铁旅客列车运行线布局优化研究

王博宙¹, 宋杰¹, 倪少权^{1,2,3*}

¹西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都

²综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都

³综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都

收稿日期: 2024年1月22日; 录用日期: 2024年3月5日; 发布日期: 2024年3月13日

摘要

随着高速铁路成网建设, 在以跨线运营为主的既有运输组织模式下, 繁忙干线区段能力紧张、路网整体效能不足的问题逐渐突出。列车运行图是反映客流需求情况、决定企业效率效益的重要运行生产计划, 而列车运行线布局优劣直接影响了运行图的编制质量。跨线列车运行线应满足跨线客流对于始发、终到时刻的要求, 而本线列车运行线则应匹配高峰时段充足的本线客流需求。考虑上述差异, 以跨线乘客期望始发终到时间满意度最大和高峰时段相邻跨线列车间可插入本线列车数量最多为目标构建优化模型, 采用模拟退火算法求解, 并通过实例进行验证。结果表明, 优质时段内本线及跨线列车间存在竞争性, 应结合需求选取适宜的方案。模型对于协调本线及跨线客流对运力资源占用的竞争关系, 实现流线匹配的目标提供了一定的参考。

关键词

客流需求, 效率效益, 列车运行线布局, 模拟退火算法, 流线匹配

Research on Optimization of High-Speed Passenger Train Operation Line Layout Considering Efficiency and Benefit

Bozhou Wang¹, Jie Song¹, Shaoquan Ni^{1,2,3*}

¹School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²National and Local Joint Engineering Laboratory of Comprehensive Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 22nd, 2024; accepted: Mar. 5th, 2024; published: Mar. 13th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王博宙, 宋杰, 倪少权. 考虑效能的高铁旅客列车运行线布局优化研究[J]. 交通技术, 2024, 13(2): 81-89.
DOI: 10.12677/ojtt.2024.132010

Abstract

With the construction of high-speed railway network, under the existing transport organization mode mainly based on cross line operation, the problems of tight capacity of busy trunk sections and insufficient overall efficiency and benefit of the railway network are gradually prominent. Train operation diagram is an important operation and production plan to reflect the passenger flow demand and determine the efficiency and benefit of enterprises, and the quality of train diagram is directly affected by the quality of train operation line layout. The operation line of cross line trains should meet the requirements of cross line passenger flow for departure and arrival times, while the operation line of this line should match the sufficient passenger flow demand of this line during peak hours. Considering the above differences, the optimization model is constructed aiming at the maximum expected satisfaction of cross line passengers and the maximum number of trains can be inserted between adjacent cross line trains during peak hours. The model is solved by simulated annealing algorithm and verified by an example. The results indicate that there is competition between trains on this line and cross line trains during high-quality time periods, and the appropriate scheme should be selected according to the demand. The model provides a certain reference for coordinating the competition between the passenger flow of this line and cross-line and realizing the goal of streamline matching.

Keywords

Passenger Flow Demand, Efficiency and Benefit, Train Operation Line Layout, Simulated Annealing Algorithm, Streamline Matching

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着高速铁路网的建设完善以及经济水平的不断提升，我国铁路旅客出行量持续增长。既有的铁路运输组织模式以跨线运营为主，路网上开行的跨线列车总量较大。对于衔接多条线路的繁忙干线，区段能力紧张问题日益凸显。此外，由于干线上跨线列车停站较多，与本线列车形成竞争关系，“长线短流”问题也逐渐加重，路网整体效能呈现不足。对列车运行线布局进行调整优化，以缓解铁路运能与乘客需求间的供需矛盾成为研究重点。

对于繁忙高铁干线，列车运行线布局优化主要研究两类问题，一类是本线及跨线列车运行线的协调铺画，一类是列车运行线停站与越行方案的合理设置。目前，针对于上述问题已有大量研究，陈霞[1]以动车组运用最优和旅客期望出行时间满意度最大为目标对高速铁路跨线列车布局进行优化；韩润奇[2]以相邻跨线列车之间可开行本线列车数量最大为目标对高速铁路跨线列车运行方案进行优化；张小炳[3]以提升高速铁路列车运行图通过能力为目标对列车运行线顺序进行优化；吴达[4]提出“各线路区段优先铺画满能力规格化运行图，再进行运行线选择”的跨线列车布局优化思想，并构建了列车运行线选取优化模型以提升效能；闫海峰和于丽[5]以列车运行线在运行图上占用时间最少为目标对高速铁路区段列车停站与越行情况进行优化；邵长虹等[6]以满足列车停站次数、均衡性、可达性、最大化利用通过能力为目

标对高速铁路列车停站方案问题进行分析。

综上可知,列车运行线布局优化主要围绕客流需求和能力利用两方面展开,但既有研究对本线及跨线客流需求与运行线匹配程度考虑有所欠缺。繁忙干线上开行大量跨线列车限制了本线列车的铺画及调整,导致本线客流与运行线较难匹配。因此,本文以跨线列车运行线调整为着手点,优化本线及跨线列车运行线布局,以协调本线与跨线客流对运力资源占用的竞争关系,实现流线匹配和效能提升的目标。

2. 本线及跨线列车运行线布局问题分析

列车运行图是联系乘客和企业的纽带,合理的列车运行线布局应综合考虑乘客出行需求及企业效率效益,实现两者间的平衡。企业效益包括社会效益和经济效益两部分[7],其中社会效益较难衡量,本文重点考虑经济效益,即收入与成本的差值。当列车开行种类、数量及径路固定时,对列车开行时间进行调整,成本相对波动不大。此时,客票收入是影响经济效益的关键因素。当运行线与客流需求相匹配时,可以扩大对于乘客的吸引程度,增加客座率,以有效提升经济效益。因此,列车运行线布局优化问题即在最大程度匹配客流需求的基础上,铺画一张充分发挥运力资源的运行图,以实现效能提升的目标。

跨线列车运行线应尽可能满足长途跨线乘客对于始发终到时间的需求,以提升旅客出行满意度,进而保证客座率。跨线列车合理时间范围应满足以下条件[8] [9] [10] [11]:(1)跨线列车始发时刻在[7:00:00~24:00:00]内。(2)跨线列车在高铁线上运行时刻不在维修天窗范围之内。(3)跨线列车终到时刻在[7:00:00~23:00:00]内。此外,在客流高峰时段,本线列车相较于跨线列车更能充分发挥运力资源,满足集中的本线客流需求。因此,应尽可能在高峰时段开行本线列车,即减少跨线列车运行线对于高峰时段的占用,从而提升效能[12]。

综上,可将本线及跨线列车运行线布局优化问题描述为:在跨线列车开行方案给定的前提下,通过调整跨线列车开行时间,使其在满足合理到发时间域及基本行车约束条件下,求解跨线乘客期望始发终到时间满意度最大(跨线客流需求)及高峰时段相邻跨线列车间可插入本线列车数量最多(本线客流需求)的多目标优化问题。

3. 模型构建

3.1. 模型假设

- (1) 假设跨线列车开行方案给定,列车开行种类、数量、径路等信息已知。
- (2) 假设上下行列车互不干扰,仅需考虑单个确定线路方向的跨线列车运行线布局优化。
- (3) 假设线路及车站通过能力均满足要求。
- (4) 假设动车组资源充足,不考虑其影响。
- (5) 不考虑列车间越行情况的影响,仅通过关键站的时刻确定运行图的基本骨架。

3.2. 目标函数

- (1) 跨线乘客期望始发终到时间满意度最大[1]。

对于不同的跨线列车始发终到时间,跨线乘客满意度有所差异,图1表示了跨线乘客的模糊期望始发(终到)时间。其中 $[T_1, T_4]$ 为跨线列车合理始发(终到)时间范围, $[T_2, T_3]$ 为跨线乘客满意度最大的始发(终到)时段。

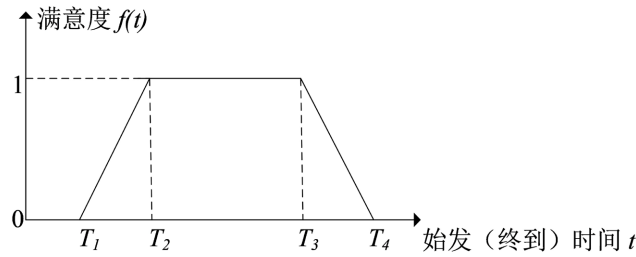


Figure 1. Fuzzy expected departure (arrival) time
图 1. 模糊期望始发(终到)时间

$$f(t) = \begin{cases} \frac{t-T_1}{T_2-T_1} & t \in [T_1, T_2] \\ 1 & t \in [T_2, T_3] \\ \frac{t-T_4}{T_3-T_4} & t \in [T_3, T_4] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\max Z_1 = \alpha_1 \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \beta_{ij}^k \cdot f(t_{ij}^{ksf}) + \alpha_2 \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \beta_{ij}^k \cdot f(t_{ij}^{kzd}) \quad (2)$$

式中： β_{ij}^k 为在径路 $S_i S_j$ 上开行的跨线列车 k 的等级系数； $f(t_{ij}^{ksf})$ 为在径路 $S_i S_j$ 上开行的跨线列车 k 的乘客始发时间满意度； t_{ij}^{ksf} 为跨线列车 k 的始发时间； $f(t_{ij}^{kzd})$ 为在径路 $S_i S_j$ 上开行的跨线列车 k 的乘客终到时间满意度； t_{ij}^{kzd} 为跨线列车 k 的终到时间； N 为车站集合； K 为跨线列车集合； α_1 、 α_2 为权重系数， $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ， $0 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1$ ，本文取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

(2) 高峰时段相邻跨线列车间可插入本线列车数量最多[2]。

$$\max Z_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \left[\min \left\{ \left| \frac{t_{ij}^{kgcf} - t_{i'j'}^{k'gcf} - I}{I} \right|, \left| \frac{t_{ij}^{kgmd} - t_{i'j'}^{k'gmd} - I}{I} \right| \right\} \right] \quad (3)$$

式中： t_{ij}^{kgcf} 、 t_{ij}^{kgmd} 分别为在径路 $S_i S_j$ 上开行的跨线列车 k 在共用区段初始站的发车时刻和共用区段末尾站的终到时刻； $t_{i'j'}^{k'gcf}$ 、 $t_{i'j'}^{k'gmd}$ 分别为在径路 $S_{i'} S_{j'}$ 上开行的与跨线列车 k 紧邻的前行列车 k' 在共用区段初始站的发车时刻和共用区段末尾站的终到时刻； $t_h^l \leq t_{ij}^{kgcf}, t_{ij}^{k'gcf} \leq t_h^u$ ， $[t_h^l, t_h^u]$ 为共用区段的客流高峰时段； $\min\{a, b\}$ 代表取 a 、 b 中的较小值； I 为列车追踪间隔时间。

3.3. 约束条件

(1) 合理到发时间域约束。跨线列车的始发、终到及衔接站到达时刻均应在合理时间范围内。

$$T_{ksf1} \leq t_{ij}^{ksf} \leq T_{ksf2} \quad (4)$$

$$T_{kzd1} \leq t_{ij}^{kzd} \leq T_{kzd2} \quad (5)$$

$$T_{kxd1} \leq t_{ij}^{kxd} \leq T_{kxd2} \quad (6)$$

式中： $[T_{ksf1}, T_{ksf2}]$ 为跨线列车 k 的合理始发时间范围； $[T_{kzd1}, T_{kzd2}]$ 为跨线列车 k 的合理终到时间范围； $[T_{kxd1}, T_{kxd2}]$ 为跨线列车 k 的合理到达衔接站时间范围。

(2) 相邻跨线列车间隔时间约束。任意两列跨线列车在同一始发站、同一衔接站、同一终到站均应满足出发及到达间隔约束。此外，所有跨线列车在共用区段初始站和共用区段末尾站也应满足间隔约束。

$$\left| t_{ij}^{ksf} - t_{ij}^{k'sf} \right| \geq I_f \quad (7)$$

$$\left| t_{ij}^{kzd} - t_{ij}^{k'zd} \right| \geq I_d \quad (8)$$

$$\left| t_{ij}^{kxd} - t_{ij}^{k'xd} \right| \geq I_d \quad (9)$$

$$\left| t_{ij}^{ksf} - t_{ij}^{k'sf} \right| \geq I_f \quad (10)$$

$$\left| t_{ij}^{kgsf} - t_{ij}^{k'gsf} \right| \geq I_f \quad (11)$$

$$\left| t_{ij}^{kgmd} - t_{ij}^{k'gmd} \right| \geq I_d \quad (12)$$

式中： I_f 为列车出发间隔时间； I_d 为列车到达间隔时间。

(3) 跨线列车旅行时间约束。跨线列车旅行时间在运算过程中保持固定不变。

$$t_{ij}^{kzd} - t_{ij}^{ksf} = T_{ij}^{kqc} \quad (13)$$

$$t_{ij}^{kxd} - t_{ij}^{ksf} = T_{ij}^{kxs} \quad (14)$$

$$t_{ij}^{kgsf} - t_{ij}^{ksf} = T_{ij}^{ksgc} \quad (15)$$

$$t_{ij}^{kgmd} - t_{ij}^{kgsf} = T_{ij}^{kgcm} \quad (16)$$

式中： T_{ij}^{kqc} 为跨线列车 k 的全程运行时间； T_{ij}^{kxs} 为跨线列车 k 从始发站到衔接站的运行时间； T_{ij}^{ksgc} 为跨线列车 k 从始发站到共用区段初始站的运行时间； T_{ij}^{kgcm} 为跨线列车 k 在共用区段的运行时间。

(4) 停站作业时间约束。跨线列车在衔接站停站时间，为衔接站出发和到达时刻的差值。

$$t_{ij}^{ksf} - t_{ij}^{kxd} = x_{ij}^k \cdot T_{ij}^{kxt} \quad (17)$$

式中： x_{ij}^k 为 0~1 变量，若跨线列车 k 在衔接站停车，则为 1，否则为 0； T_{ij}^{kxt} 为跨线列车 k 在衔接站的停留时间。

(5) 跨线列车始发时间点约束。对于跨越多条线路的长大跨线列车或有特定需求的跨线列车，固定其原有时刻，不进行调整。

$$t_{ij}^{k_gsf} = T_{ij}^{k_gsf} \quad (18)$$

式中： k_g 为有特定始发时刻需求的跨线列车； $t_{ij}^{k_gsf}$ 为跨线列车 k_g 的始发时刻； $T_{ij}^{k_gsf}$ 为从原运行图中获得的参考始发时刻。

(6) 跨线列车分布均衡性约束。跨线列车在高峰时段外分布应尽可能均衡，通过对高峰时段外跨线列车分时段上线数量进行限制，以满足一定的均衡性要求。

$$\sum_{k \in K} x_k(t) \leq \left\lfloor \frac{K}{T_{KY} - T_G} \right\rfloor \quad (19)$$

式中： T_{KY} 为跨线列车区段内上线时间范围，可参考原运行图； T_G 为客流高峰时段范围； $x_k(t)$ 为 0~1 变量，将 $(T_{KY} - T_G)$ 以 1 小时为单位划分成 m 个时间段，即 $(T_{KY} - T_G) = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ，若跨线列车 k 在 t 时段内上线则 $x_k(t)$ 为 1，反之 $x_k(t)$ 为 0。

4. 模型求解

本文所构建模型为多目标优化模型，各目标间相互影响，无法直接评判解的优劣，采用线性加权法将

其转化为单目标优化模型。由于各目标函数的量纲不同，需先进行标准化处理统一量纲，再进行线性加权。

$$\max Z = \max \sum_{i=1}^2 \lambda_i \frac{f_i(X) - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (20)$$

式中： λ_i 为各目标函数的加权系数， $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ， $0 \leq \lambda_1, \lambda_2 \leq 1$ ； $f_i(X)$ 为各目标函数的值。

对于目标函数 Z_1 ，每获得一组可行解，即可确定对应解中乘客始发时间、终到时间满意度的最大及最小值，进而用于归一化。对于目标函数 Z_2 ，高峰时段相邻跨线列车可插入本线列车数量最多为 $\lfloor (t_h^u - t_h^l - I) / I \rfloor$ ，对应跨线列车全部位于高峰时段两侧的情况。高峰时段相邻跨线列车可插入本线列车数量最少为 0，即跨线列车全部位于高峰时段内，且任意两相邻跨线列车间的间隔均不满足插入一条本线列车运行线。

模型采用模拟退火算法进行求解。

解的结构如下：

$$J = \left(\begin{array}{cccccc} 1 & 2 & \dots & k & \dots & K \\ t_{ij}^{1sf} & t_{ij}^{2sf} & \dots & t_{ij}^{ksf} & \dots & t_{ij}^{Ksf} \\ t_{ij}^{1xd} & t_{ij}^{2xd} & \dots & t_{ij}^{kxd} & \dots & t_{ij}^{Kxd} \\ t_{ij}^{1xf} & t_{ij}^{2xf} & \dots & t_{ij}^{kxf} & \dots & t_{ij}^{Kxf} \\ t_{ij}^{1zd} & t_{ij}^{2zd} & \dots & t_{ij}^{kzd} & \dots & t_{ij}^{Kzd} \\ t_{ij}^{1gcf} & t_{ij}^{2gcf} & \dots & t_{ij}^{kgcf} & \dots & t_{ij}^{Kgcf} \\ t_{ij}^{1gmd} & t_{ij}^{2gmd} & \dots & t_{ij}^{kgmd} & \dots & t_{ij}^{Kgmd} \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{列车全程关键时刻} \\ \\ \\ \\ \text{共用区段关键时刻} \end{array}$$

跨线列车的关键时刻信息全部换算成秒表示。

算法步骤如下：

Step 1: 读取所选跨线列车运行信息，包括始发站、衔接站、终到站、旅行时间等。

Step 2: 设置算法参数，包括初始温度 t_0 、降温速率 α 、马尔科夫链长度 L 、停止条件 t_{end} 等，初始迭代次数设为 0。

Step 3: 生成初始可行解，并计算目标函数值。由于模拟退火算法用于求解最小化问题，因此需对原目标函数取负。

Step 4: 对初始可行解进行扰动，生成新解。随机选取若干列跨线列车(有特定始发时刻需求的跨线列车除外)，重新生成在合理始发时间域范围内的跨线列车始发时刻(整数)，并依据已知的跨线列车运行信息，计算其余关键时刻点数值。判断新解是否满足约束条件，若满足则进入 Step 5，若不满足则重新生成新解。

Step 5: 计算新解目标函数值，并依据 Metropolis 原则判定是否接受新解。若接受新解，则更新初始可行解为新解、目标函数值为新解的目标函数值，否则保留初始可行解及原目标函数值。

Step 6: 迭代次数加 1，判断是否满足马尔科夫链长度，若满足则进入 Step 7，若不满足则进入 Step 4。

Step 7: 进行降温操作 $t_{k+1} = \alpha \cdot t_k$ ， $k = k + 1$ 。比较当前温度与停止条件温度值，若满足算法停止条件(当前温度达到停止条件温度)，则算法结束输出最优解，否则重置迭代次数，进入 Step 4。

5. 实例分析

5.1. 参数取值

选取 2019 年第二季度京沪高铁“南京南 - 上海虹桥”区段列车运行图，对下行方向中以南京南、上海虹桥为共用区段初始、末尾站的 48 列跨线列车进行优化。

由于跨线列车调整难度随着其运营径路长度增加而递增，因此以全程旅行时间为标准对跨线列车采取了分级策略，如图 2 所示。固定运行时长 10 h 及其以上的跨线列车(特定始发时刻需求)，此外依据跨线列车全程旅行时间设置不同等级系数 β_{ij}^k ，进而体现其调整难度及客流需求情况。全程旅行时间 10 h 以上等级系数设为 3，全程旅行时间[6 h, 10 h)等级系数设为 2，全程旅行时间[3 h, 6 h)等级系数设为 1。

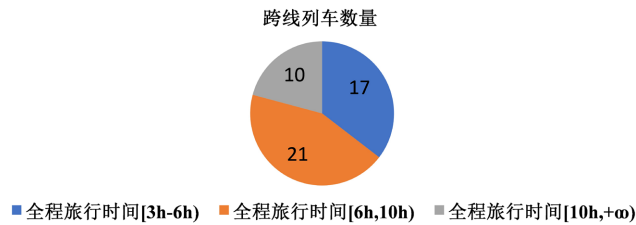


Figure 2. Classification of cross-line trains
图 2. 跨线列车分级

根据历史客流及运行图数据可知“南京南 - 上海虹桥”高峰时段为[13 h, 20 h]，跨线列车区段内上线时间范围为[7 h, 23 h]，列车出发间隔时间 I_f 为 5 min；列车到达间隔时间 I_d 为 4 min；列车追踪间隔时间 I 为 3 min。由于京沪高铁全线运行时间为 7:00:00~24:00:00，所衔接线路均为高铁线路，合理终到时间约束可扩大至 24 h，使用同余理论 [13]，计算得该区段内跨线列车的合理始发时间 $t_{ij}^{ksf} \in [25200, 86400 - T_{ij}^{kqc}]$ 。为简化运算，定义跨线乘客的模糊期望始发终到(时间)为：

$$f(t) = \begin{cases} \frac{t - 25200}{18000} & t \in [25200, 43200] \\ 1 & t \in [43200, 72000] \\ \frac{t - 82800}{-10800} & t \in [72000, 82800] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

算法参数：初始温度 $t_0 = 1000$ 、降温速率 $\alpha = 0.9$ 、马尔科夫链长度 $L = 1000$ 、停止条件温度 $t_{end} = 1 \times 10^{-16}$ 。

5.2. 结果分析

当取 $\lambda_1 = 0.4$ ， $\lambda_2 = 0.6$ 时，迭代优化过程如图 3 所示，经多次迭代后目标函数收敛，获得较优解，验证了模型的可行性。

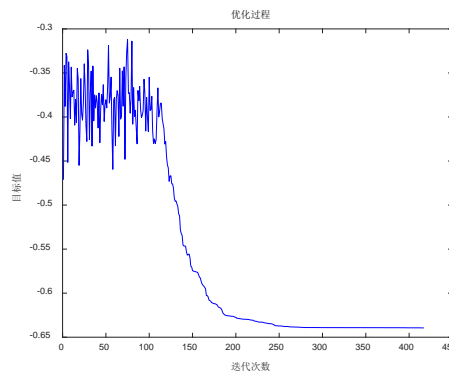


Figure 3. Number of iterations and target values
图 3. 迭代次数与目标值

如图 4 所示，为调整优化后的“南京南 - 上海虹桥”区段内下行方向 48 列跨线列车的布局方案。从图中可以看出，高峰时段内跨线列车上线数量较少，为铺画本线列车提供了空间。此外，跨线列车运行线在高峰时段外分布相对均衡。但是由于模型未考虑实际存在的越行情况且在约束条件中仅考虑了关键站的间隔约束，因此列车运行线在区段内存在交叉情况，可在铺画本线列车运行线时，结合旅客对于停站方案的需求，在运行线合理铺画时间范围内，对运行图结构进行综合调整。

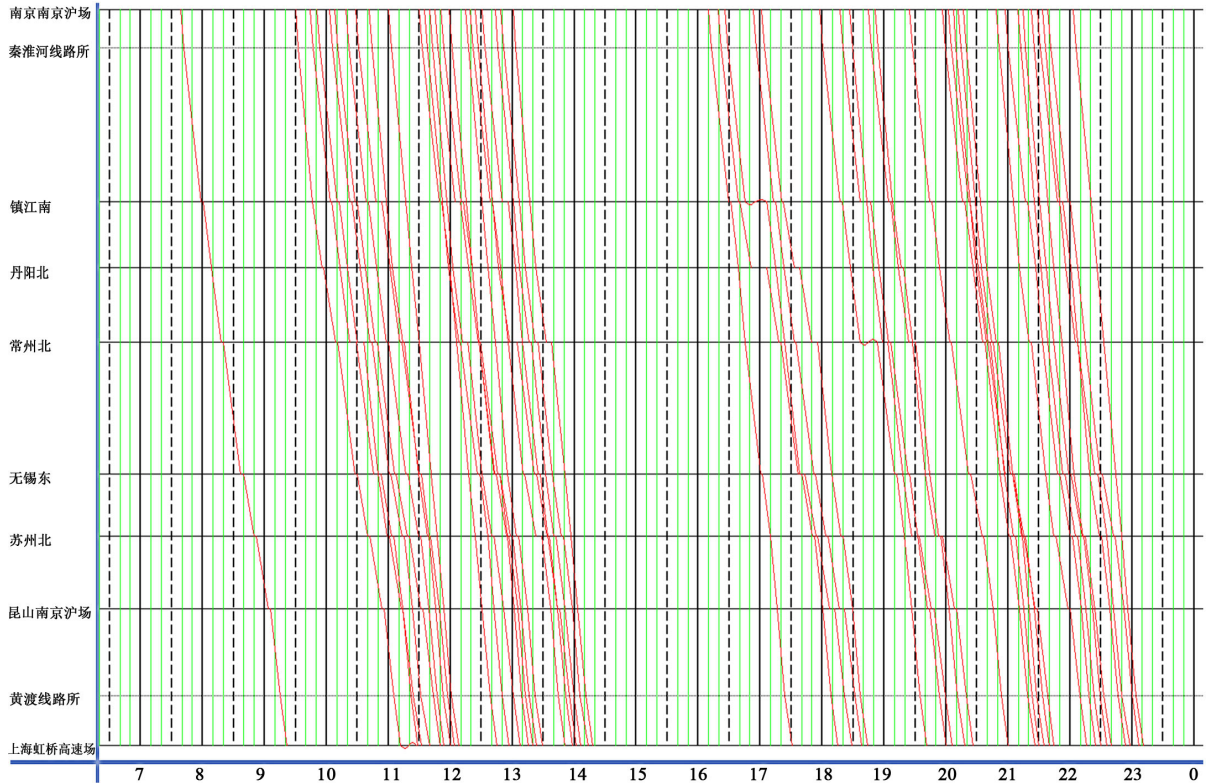


Figure 4. Optimized cross-line trains layout scheme

图 4. 优化后跨线列车布局方案

对目标函数的权重组合 (λ_1, λ_2) 取不同数值，分析其对求解结果的影响，如表 1 所示。由表可得，当目标函数 Z_1 的权重逐渐增大时，求解得到的跨线乘客期望始发终到时间满意度逐渐增大，高峰时段可插入本线列车数量逐渐减小，这反映了优质时段内本线及跨线列车对于运力资源的竞争性。目标函数值变化幅度大小差异主要由于量纲不同导致，可根据运营需求选取适宜的跨线列车布局方案。

Table 1. Solution results under different weight combinations

表 1. 不同权重组合下求解结果

方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
Z_1 权重	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Z_2 权重	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
跨线乘客期望出行时间满意度	51.9442	54.5820	55.2601	59.5474	65.5294	70.9947
高峰时段内可插入本线列车数量	115	114	113	108	100	30

6. 结论

本文主要研究繁忙高铁干线列车运行线布局优化问题,从提高本线及跨线客流需求与运行线匹配性的角度出发,构建了优化模型。模型以跨线乘客期望始发终到时间满意度最大和高峰时段相邻跨线列车间可插入本线列车数量最多为优化目标,采用模拟退火算法进行求解,并以京沪高铁“南京南-上海虹桥”区段内跨线列车为算例进行验证。优化后跨线列车在客流高峰时段上线数量较少,且在非高峰时段分布相对均衡,为铺画本线列车运行线提供了富余空间。此外,通过变化目标函数的权重组合分析得,本线及跨线列车在客流高峰时段内对运力资源存在竞争性,应综合考虑企业运营及乘客出行需求,设置合理的列车运行线布局方案。由于实际的列车运行线布局问题更为复杂,本文仅选取了区段进行研究,如何实现路网复杂拓扑关系下的列车运行线布局优化需进一步研究。

基金项目

中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2021X009);京沪高速铁路股份有限公司科技研究项目(京沪科研-2022-7);国家自然科学基金项目(52072314)。

参考文献

- [1] 陈霞. 高速铁路跨线列车运行方案优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [2] 韩润奇. 跨线列车大量开行条件下高速铁路通过能力优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [3] 张小炳, 倪少权, 潘金山. 高速铁路列车运行图结构优化研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 938-943.
- [4] 吴达. 高速铁路跨线列车运行线布局优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [5] 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(3): 8-16.
- [6] 邵长虹, 吕苗苗, 邹葱聪, 等. 基于规格化列车运行图的京沪高速铁路列车停站方案设计[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(7): 1-6.
- [7] 王翔. 基于效益效率的高速铁路列车开行方案优化技术[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [8] 张铭. 高速铁路旅客列车开行方案编制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [9] 马建军, 胡思继, 周曦, 等. 京沪高速铁路高中速列车到发时间域的计算方法[J]. 北方交通大学学报, 2002(5): 28-31.
- [10] 张玉召, 严余松. 客运专线跨线列车合理始发范围的确定方法研究[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(3): 79-82.
- [11] 彭其渊. 客运专线运输组织[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 路网条件下铁路列车运行方案图优化理论与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017: 140-142.
- [13] 吴达. 京沪高铁跨线列车合理发到时间域确定方法[J]. 山东交通学院学报, 2018, 26(1): 51-58.