文章编号:1673-0291(2026)03-0022-09 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250128

可售无座票条件下的高铁列车开行方案优化

查伟雄,胡佳伟,李 剑,石俊刚
(华东交通大学 交通运输工程学院,南昌 330013)

摘 要:为提高高铁列车开行方案对日常客流的适应能力,提出可售无座票条件下的高铁列车开行方案优化方法.考虑并非所有旅客都会接受无座票,首先需要明确购买无座票的目标群体,通过建立Logit模型分析当有座票票额售罄时,旅客对无座票的接受程度,同时将起点至终点的旅客(Origin-Destination,OD)划分为只接受有座票旅客和可接受无座票旅客,并在后续求解过程中对两类旅客进行分开配流.其次,以旅客广义旅行时间和铁路运营成本最小为目标函数,以两类票型数量满足不同的旅客出行需求、每个区间票额满足列车定员约束等为约束条件建立模型.针对旅客广义旅行时间,为购买无座票的旅客的旅行时间添加时间惩罚系数以减少旅客购买无座票的情形,从而在满足上座率的条件下保障旅客舒适度.由于模型涉及变量众多、决策规模庞大,设计一种遗传算法与Gurobi求解器相结合的算法进行求解,利用Gurobi对有座票旅客和无座票旅客进行分开配流,同时求解出票额分配方案和目标函数值,并将计算结果作为适应度值进行后续遗传算法操作,最后选取北京至上海高速铁路进行案例分析.研究结果表明:考虑无座票的列车开行方案与不考虑无座票的方案对比,旅客的总旅行时间减少了3.15%,铁路运营成本减少了8.71%,同时票额分配方案与客流需求的匹配度较高,验证了模型和算法的有效性.

关键词:高速铁路;列车开行方案;无座票;Logit模型;遗传算法
中图分类号:U293.1 **文献标志码**:A

Optimization of high-speed train operation plan considering the availability of unreserved tickets

ZHA Weixiong, HU Jiawei, LI Jian, SHI Jungang
(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To improve the adaptability of high-speed train operation plans to daily passenger flows, this paper proposes an optimization method for high-speed train operation planning that considers the availability of unreserved tickets. Recognizing that not all passengers are willing to accept unreserved tickets, it is first necessary to identify the target demographic for this ticket type. A Logit model is established to analyze passenger acceptance of unreserved tickets when reserved tickets are sold out. Simultaneously, Origin-Destination (OD) passengers are categorized into two groups: those who exclusively accept reserved tickets and those who are willing to accept unreserved tickets. Passenger flow is allocated separately for these two groups during the subsequent solution process. Second, an optimization

收稿日期:2025-07-31;**修回日期**:2026-01-21
基金项目:国家自然科学基金(72161010)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (72161010)
第一作者:查伟雄(1963—),男,江西修水人,教授,博士,博士生导师.研究方向为交通运输系统优化.**email**:1033723954@qq.com.

引用格式:查伟雄,胡佳伟,李剑,等.可售无座票条件下的高铁列车开行方案优化[J].北京交通大学学报,2026,50(3):22-30.
ZHA Weixiong, HU Jiawei, LI Jian, et al. Optimization of high-speed train operation plan considering the availability of unreserved tickets[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(3): 22-30. (in Chinese)

model is constructed with the dual objectives of minimizing passengers' generalized travel time and railway operational costs. This is subject to constraints ensuring that the quantities of both ticket types meet diverse travel demands and that the ticket allo-cation in each section complies with train capacity limits. To account for generalized travel time, a time penalty coefficient is applied to the travel time of passengers purchasing unreserved tickets; this penalization aims to minimize unreserved ticket purchases, thereby safeguarding passenger comfort while satisfying the load factor requirement. Given the multitude of variables and the large scale of the decision-making model, a hybrid approach combining a Genetic Algorithm (GA) and the Gurobi solver is developed. The Gurobi solver is utilized to separately allocate passenger flow for reserved and unreserved ticket holders, simultaneously determining the ticket allocation scheme and the objective function values. These results then serve as fitness values for the subsequent GA operations. Finally, a case study based on the Beijing-Shanghai high-speed railway is conducted. The results demonstrate that, compared to operation plans that do not offer unreserved tickets, the proposed plan reduces total passenger travel time by 3.15% and railway operation costs by 8.71%. Furthermore, the ticket allocation scheme aligns closely with passenger demand, verifying the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: high-speed railway; train operation plan; unreserved tickets; Logit model; genetic algorithm

高铁列车开行方案是旅客运输组织的重要技术文件,也是列车运行图编制的基础."按流开车"是制定高铁列车开行方案的基本原则,铁路部门在面对节假日、春运等客流出现显著变化时,会选择重新编制高铁列车开行方案以满足客流需求,而对于日常客流,则会采用相对固定的开行方案.然而,当日常客流波动时,既定的开行方案会导致运力与需求不匹配,出现运力浪费或客源损失的情况.因此,通过可售无座票来临时提高列车运力,对高铁列车开行方案适应日常客流的波动及减少铁路运营成本具有重要意义.

针对高铁列车开行方案的优化问题,文献[1]考虑以票价、旅行时间和出发时间偏差最小建立优化模型,设计自适应大邻域搜索算法来求解此模型并得到很好的求解效果.文献[2]以最小化开行方案调整幅度、总停站次数、客流起讫点,建立整数规划模型.文献[3]提出影响旅客满意度的出行时段方便度、舒适度及旅行时间满意度等,构建旅客出行满意度函数,并建立双层规划模型来解决此类问题.文献[4-5]从多日需求场景和不同需求日对旅客列车开行方案进行优化,建立不同需求的开行方案.文献[6]以旅客时变客流为输入条件,优化列车开行方案,满足了旅客在空间维度和时间维度的需求.文献[7-8]通过Logit模型确定了座席分担率,以铁路运输收益最大化和未满足理想席位的旅客数量最少为目标建立模型.文献[9]为解决大规模路网开行方案中优化效率问题,提出动态生成方案线刻画旅客出行路径的网络表示方法,设计算法有效提升了求解效率.针对票额分配的优化问题,文献[10]对旅客选择行为进行研究,利用潜在类别模型对旅客进行分类,并对票价与票额进行协同优化.文献[11]针对长、短途旅客提出"长途优先"的席位控制策略,验证了分段式票额分配策略的有效性.文献[12]提出基于Davidon-Fletcher-Powell方法的求解算法,优化高铁多阶段定价与席位分配大规模综合问题.文献[13]考虑旅客分类下高速铁路票价和票额综合优化,并以两者为决策变量建立优化模型,设计模拟退火算法与杉数优化求解器(Cardinal optimizer,Copt)相结合的方法求解该模型.文献[14]综合考虑了定价和座位分配,提出用多项式Logit和潜在类模型的离散选择方法来描述铁路旅客购票情况.也有学者考虑列车开行方案与票额分配的综合优化问题.文献[15]运用Logit模型描述分时弹性客流的列车选择行为,以客票总收入与运营总成本之差最大为目标构建优化模型,并设计模拟退火算法+Cplex进行求解,最终得到很好的效果.文献[16]以客票收入和运营成本之差为目标构建模型,利用遗传算法和Gurobi来求解开行方案和票额分配问题,并得到了很好的结果.文献[17]在列车开行方案中融合票价与票额决策,从而提升高铁列车开行效率与旅客出行服务质量.

高铁列车开行方案通常要求全程对号入座,现有关于高铁列车开行方案、票额分配及两者综合优化的文献大多也是基于这一前提展开研究,鲜有文献考虑将无座票纳入旅客选择范围.实际上,通过合理分配无座票不仅能提高铁路运输效率,同时可

以增强高铁列车开行方案对日常客流波动的适应能力.因此本文通过出售无座票来适当提高列车的定员人数,并建立Logit模型对购买不同票型的旅客进行量化,最后建立开行方案优化模型,设计遗传算法+Gurobi求解器的方法进行模型求解.

1 问题描述及模型分析

在给定客流前提下,提出一种可售无座票条件下的高铁列车开行方案优化方法,首先需明确研究对象,并分析无座票服务的旅客类型,最后建立模型来优化高铁列车开行方案.

1.1 问题数学描述

考虑单线单向情形下高铁列车开行方案和客流分配优化问题,设高铁线路$l=(S,L)$,将列车车站集合记为S,每个车站$S_i\in S,i=1,2,\cdots,y$,将车站区间集合记为L,每个区间$L_i\in L,i=1,2,\cdots,y$,各车站区间列车纯旅行时间为t_i,其中$t_i\in T,i=1,2,\cdots,y$,旅客OD记为n_{ij},其中i,j为旅客起终点索引且$i,j\in N$,车站由始发终到车站和非始发终到车站组成,如图1所示.

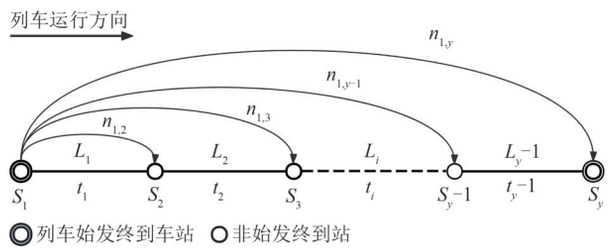


图1 高铁线路示意图

Fig.1 Schematic diagram of high-speed railway route

针对线路区间和车站,记D_l为线路l的最大通行能力,D_{S_i}为车站S_i的最大接发能力.定义列车集合为F,每个列车$f\in F$,对每列车进行参数定义:列车定员人数为B,列车因停站导致旅行时间增加量为K,列车在(i,j)区间内的旅行时间为T_{ij},纯旅行时间为t_{ij}.考虑有座票和无座票票价相同但舒适度相差较大,需要分别明确只接受有座票旅客$n_{ij}^{w_1}$的数量和可接受无座票的旅客$n_{ij}^{w_2}$的数量,从而进行两类票型的票额分配.模型涉及的决策变量为列车f在车站S_i的停站变量$x_{s_i}^f$,b_{ij}^{f,w_1}、b_{ij}^{f,w_2}分别为列车f为OD对(i,j)提供的有座票w_1和无座票w_2的票额数,列车开行频率为f_r,列车f从始发站至终到站运行的里程为s_f.

1.2 模型假设

在建立数学模型时,重点围绕高铁列车开行方案和两类票型的票额分配进行优化,因此对高铁运输服务过程需进行必要的假设:所有高铁列车的有座席位均为二等座,不考虑一等座和商务座;在高铁线路上,每个车站允许发售一定比例的无座票,同时每趟高铁列车均可出售一定数量的无座票;高铁列车在各站因停站而导致的旅行时间增加量是相同的,不因上下车旅客数量而改变;在优化高铁列车开行方案过程中,各车站的接发能力和线路区间通过能力能够满足所有旅客出行需求.

1.3 旅客无座席位接受概率分析

铁路运输的特点是优先保障中长途旅客的出行需求,因此铁路部门会为中长途旅客预留一定数量的有座票额,而短途旅客被分配的票额数量则相对有限,这种分配方式会在列车运能紧张的情况下导致部分短途旅客的购票需求难以满足,此时通过出售无座票一定程度上可以缓解票额紧张的情况.同时对于购买无座票的旅客,旅行时间越长,乘车体验越差,因此相较于中长途旅客,短途旅客会更愿意接受无座票.另外,影响旅客选择不同席位的主要因素为经济性和舒适度,经济性的主要指标为票价,而对于同一列车,有座票和无座票实行相同定价政策,因此不考虑将票价作为旅客是否接受无座票的影响因素.就舒适度而言,无座票舒适度远低于有座票,且旅客旅行距离越长,乘车舒适度越低,其购买无座票的意愿也越低.综上分析可知,无座票主要出售对象为短途旅客,同时将旅行时间作为衡量旅客是否接受无座票的主要影响因素.基于此,考虑通过旅客选择列车f的旅行时间T_{ij}^f作为主要指标构建Logit模型,从而量化不同旅客对无座票的接受程度.

旅行时间T_{ij}^f是影响旅客是否选择无座票的最重要因素,旅行时间T_{ij}^f包括列车在区间的纯运行时间t_{ij}^f及因列车停站而导致的旅行时间增加量K,旅客选择列车f的旅行时间为

$$T_{ij}^f=\left(t_{ij}^f+\sum_{a=i+1}^{j-1}K\cdot x_{s_a}^f\right) \tag{1}$$

通过Logit模型分析不同OD旅客选择不同列车时可接受无座票的旅客比例,并将旅客划分为可接受无座票旅客和只接受有座票旅客,以此确定两类旅客数量,Logit模型表达为

$$p_{ij}^f=\frac{\exp\left(\beta_1\cdot T_{ij}^f-\beta_2\right)}{1+\exp\left(\beta_1\cdot T_{ij}^f-\beta_2\right)} \tag{2}$$

式中:β_1为效用函数T_{ij}^f的系数;β_2为常数项.

由于部分旅客只接受有座票,因此高铁列车开行方案为OD对(i,j)分配的有座票票额需大于或等于只接受有座票旅客数,即$b_{ij}^{f,w_1}\geqslant n_{ij}\cdot(1-p_{ij}^f)$,当有座票票额分配完成后,无座票票额则由剩余旅客数量来确定,即$b_{ij}^{f,w_2}=n_{ij}-b_{ij}^{f,w_1}$,以此确定两类票型的票额分配.同时根据动车组列车旅客运输管理办法,高铁列车无座票最高可出售数量不得超过列车定员人数的20%,因此无座票在每个车站区间提供的票额数还需满足$b_{ij}^{f,w_2}\leqslant 0.2B$.

1.4　优化模型的构建

高铁列车开行方案的优化需要同时考虑旅客和铁路部门的成本,因此在给定客流OD的情况下,从旅客和铁路部门两个角度建立优化模型.

1.4.1　目标函数

以旅客乘车总时长最小为第一目标函数,旅客总旅行时间T_{ij}^f包括列车纯运行时间和列车停站时间.由于旅客倾向于选择有座席位,仅在有座票售罄时,部分旅客才会接受无座票,同时为尽量提高列车席位上座率,模型应减少旅客选择无座票的情况,以保证最大化分配有座票.因此本文引入旅客广义旅行时间这一概念,针对无座票旅客的旅行时间,在目标函数中添加时间惩罚系数,通过额外增加惩罚时间来减少选择无座票的旅客数.无座票旅客的旅行时间为

$$T^{w_2}=\sum_{f=1}^{\mathrm{Fr}}\sum_{i=1}^{y-1}\sum_{j=i+1}^{y}\lambda\cdot b_{ij}^{f,w_2}\cdot T_{ij}^f \tag{3}$$

式中:λ为时间惩罚系数;Fr为列车总开行数.

以所有旅客总旅行时间为第一目标函数,其函数为

$$\min T_{总}=\sum_{f=1}^{\mathrm{Fr}}\sum_{i=1}^{y-1}\sum_{j=i+1}^{y}\left(b_{ij}^{f,w_1}\cdot T_{ij}^f\right)+T^{w_2} \tag{4}$$

以铁路运营成本最小为第二目标函数,铁路运营成本包括固定成本和变动成本,其中固定成本包括铁路线路、车站建设及机车与车辆设备的投资等,其成本不受开行方案的影响,因此不考虑这部分的影响.本文主要考虑变动成本为列车车辆走行公里数,可表示为

$$C_{成本}=\sum_{f=1}^{\mathrm{Fr}}f_r\cdot s_f \tag{5}$$

1.4.2　约束条件

铁路部门在制定高铁列车开行方案过程中需要遵循“按流开车”的基本原则,因此服务各OD(i,j)对之间拟开行的列车提供的有座票票额数和无座票票额数需满足该OD对的出行需求,约束条件式为

$$\sum_{f\in F}b_{ij}^{f,w_1}+b_{ij}^{f,w_2}=n_{ij}\qquad n_{ij}\in N_{ij} \tag{6}$$

同时,服务各OD对的列车总数所提供的有座票票额数必须满足只接受有座票旅客的客流需求,否则会造成客源的损失,约束条件式为

$$\sum_{f\in F}b_{ij}^{f,w_1}\geqslant n_{ij}^{w_1}\qquad n_{ij}^{w_1}\in N_{ij} \tag{7}$$

每辆列车在每个区间所乘载的旅客总数不得超过列车的定员人数,即列车在每个区间售出的票额总数不得超过列车的定员人数,约束式为

$$\sum_{f\in F}\sum_{i,j\in N}b_{ij}^{f,w_1}\cdot L_l\leqslant B\quad L_l\in L,\ f\in F \tag{8}$$

无座票的票额约束上限为列车定员人数的20%,约束条件式为

$$\sum_{f\in F}\sum_{i,j\in N}b_{ij}^{f,w_2}\cdot L_l\leqslant 0.2B\quad L_l\in L,\ f\in F \tag{9}$$

由于线路通过能力的限制,列车的开行数量不得超过该线路的最大通行能力,约束条件式为

$$\sum_{f\in F}f\leqslant D_l \tag{10}$$

对于线路中任意一个车站S_i,该车站的接发列车总数不应超过车站的接发能力上限,约束条件式为

$$\sum_{f\in F}f\leqslant D_{s_i}\quad \forall S_i\in S \tag{11}$$

列车开行频率、有座票票额和无座票票额均为整数,列车在任意车站是否停站为0、1变量,约束条件为$f\in N,\forall f\in F;b_{ij}^{f,w_1}\in N;b_{ij}^{f,w_2}\in N;x_{s_i}^f\in\{0,1\}$.

2　算法设计

由于决策变量为开行频率、停站变量及两类席位的票额分配,涉及变量众多,决策规模庞大,同时模型为多目标非线性规划模型且非线性表达部分在目标函数中,随着算例站点和OD数的增多,求解难度呈指数型增长,难以直接用最优精确算法进行求解.鉴于票额分配是大型的整数规划问题,而Gurobi是一种数学优化求解器,广泛应用于整数规划、混合整数规划等多种优化问题,同时启发式算法也能很好地求解大规模优化问题,因此考虑使用遗传算法+Gurobi的方法求解优化模型.

2.1　票额分配子算法

有座票和无座票的票额分配问题为大型的整数规划问题,本质上是客流分配问题,通过Gurobi求解器获得最优客流分配方案,其客流分配算法共6个步骤.

步骤1:通过遗传算法的个体编码生成初始的列车停站方案及对应的列车开行频率,随后通过

Logit模型确定各个OD对中选择列车f时，只接受有座票的旅客数和可接受无座票的旅客数.

步骤2：在Gurobi求解器中输入模型的目标函数、约束条件、高铁列车开行方案、初始两类旅客数量、各类列车参数等，并基于输入进行后续配流操作.

步骤3：优先为只接受有座票旅客分配有座席位，所有服务于某个OD对(i,j)的列车所提供的有座席位需要大于或等于只接受有座票旅客数，即需要满足约束式(7)，若无法满足约束条件，则返回步骤1，重新生成列车开行方案，直至满足该约束条件.

步骤4：计算所有列车剩余的有座席位，对部分可接受无座票旅客进行有座席位分配，最大化分配有座席位数量，同时减少所有无座票旅客的总旅行时间，即使得目标函数T^{w_2}最小.列车f为旅客提供的有座票在每个区间不得超过列车定员人数，即满足约束条件式(8).

步骤5：计算剩余旅客数量，对有座席位未满足的部分可接受无座票的旅客进行二次分配，并对其分配无座席位，同时需要满足约束条件式(9).若无座席位无法满足剩余旅客，则转入步骤1重新生成列车开行方案.

步骤6：最终满足所有旅客的出行需求，即满足约束条件式(6)，同时生成一个初始票额分配方案并返回目标函数值，随后将其作为遗传算法适应度进行后续操作.

2.2 遗传算法

2.2.1 种群初始化

取列车开行频率和停站方案为一组染色体，其中染色体前u个基因表示为列车停站变量即0、1变量，0代表列车不停站、1代表列车停站，第$u+1$个基因为开行频率，是大于或等于0的整数.染色体编码r^m为

$$r^m=\left[r_1^m,r_2^m,\cdots,r_u^m,r_{u+1}^m\right] \tag{12}$$

式中：m为染色体的个数；$m=1,2\cdots,M$；u为基因数.

2.2.2 适应度计算

目标函数为旅客广义旅行时间最小和车辆走行公里最小，考虑使用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题.旅客总旅行时间与列车车辆走行公里两个目标间存在量纲和数量级的差异，直接进行加权求和导致优化结果偏向数量级更大的目标，因此需要通过归一化消除量纲和数量级影响.两个目标函数值可预先确定边界值，同时数据不存在异常值或无限值，可以考虑使用Min-Max归一化进行处理，处理计算式为

$$\tilde{T}_{总}=\frac{T_{总}-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}} \tag{13}$$

$$\tilde{C}_{成本}=\frac{C_{总}-C_{\min}}{C_{\max}-C_{\min}} \tag{14}$$

式中：$T_{总}$为原始数据的旅客总旅行时间；$T_{\max}$、$T_{\min}$为旅行时间在数据集中最大值与最小值；$\tilde{T}_{总}$值为归一化后的旅行时间；$C_{总}$为原始数据的总铁路成本；$C_{\max}$、$C_{\min}$分别为铁路成本在数据集中最大值与最小值；$\tilde{C}_{成本}$为归一化后的铁路成本.

求解过程中对旅客广义旅行时间指标权重设为α_1，车辆走行公里权重设为α_2，最终目标函数可表示为$\min Z=\alpha_1\tilde{T}_{总}+\alpha_2\tilde{C}_{成本}$，其中$\alpha_1+\alpha_2=1$.设计子算法并利用Gurobi进行目标函数的求解，所得解将其作为适应度函数值进行后续选择、交叉操作.

2.2.3 遗传因子

遗传算法包括选择操作、交叉操作和变异操作.锦标赛相比于轮盘赌算法，可以更好地保持种群的多样性，避免适应度最高的个体主导选择的方向，因此选择操作采用锦标赛方法.交叉操作是从种群中随机选择两个个体，然后随机确定一个交叉点，将交叉点的染色体片段进行交换，生成两个新的个体.变异操作从种群中随机选取一个个体，选择个体中的一个染色体片段进行变异，变异后的新的基因值是在该基因取值范围内随机选取.

2.2.4 算法步骤

步骤1：设置列车各项参数及OD数据，并确定交叉率、变异率、初始种群数量及迭代次数.

步骤2：根据最大断面客流量确定列车开行数量并随机生成停站方案，将其作为基因进行编码并生成个体，同时筛选满足约束条件的个体，直到个体数达到设定的种群规模.

步骤3：输入每个个体的停站方案及相应的列车开行频率，针对每个开行方案的票额分配问题利用Gurobi进行求解，并计算相应的目标函数值作为算法的适应度.

步骤4：以适应度函数值的大小，作为选择优秀个体的依据并遗传到下一代，采用锦标赛选择，产生新一代种群.

步骤5：采用两点交叉对个体进行交叉处理，即在父代个体染色体上随机选择两个交叉点，将这两个点的基因片段进行交换，生成子代个体，并对个体进行变异处理，随后生成新一代种群.

步骤 6:判断上述操作后产生的新种群个体,是否满足模型的约束条件,若满足,则视为新的子代个体,否则将重新返回操作.

步骤 7:若达到最大迭代次数,终止计算并输出最优结果,否则转入步骤 4.

3　案例分析

3.1　案例背景

为验证所提模型和算法的有效性,以北京—上海高速铁路进行案例分析.京沪高铁全程 1 318 km,沿线共设计车站 24 个,为方便计算,将天津西站和天津南站统称为天津站,因此案例车站共设计 23 个,车站区间 22 个.京沪高铁沿线车站分布图如图 2 所示.

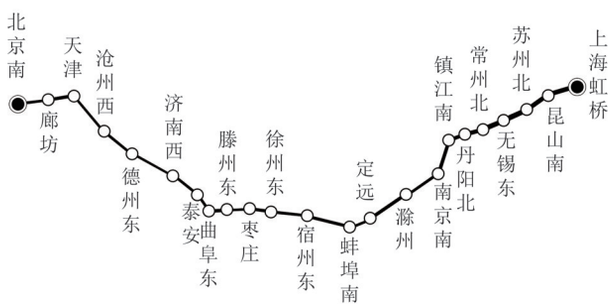


图 2　京沪高铁线路示意图

Fig.2　Schematic diagram of the Beijing-Shanghai high-speed railway

同时各车站站间距及列车区间纯运行时间如表 1 所示.

线路运营相关参数中,高铁列车定员人数为 1 200 人,列车车辆编组数为 16 编组.列车定员人数通常为有座席位数量,而铁路部门规定无座席位出售数量不得超过列车定员人数的 20%,因此无座席位数量为 240,列车在各站停车而导致的旅行时间增加量 K 设为 7 min/站.

由于目标函数为旅客广义旅行时间和铁路运营成本最小,两者量纲和量级存在区别,采取 Min-Max 归一化处理,同时两个目标函数的权重 α_1 取值为 0.4,α_2 取值为 0.6,购买无座票旅客的旅行时间的时间惩罚系数 λ 取值为 1.6.根据 2024 年京沪高铁某日下行客流数据及对应的旅行时间,通过 Logit 模型判断各个 OD 中可接受无座票旅客数和只接受有座票的旅客数.在 Logit 模型计算过程中,通过实验调查获取各区间旅客旅行时间,并在后续的计算分析中不断调整参数,最终得出效用函数 T_{ij}^{f} 的系数项 β_1 最佳取值为 −0.035、常数项 β_2 取值为 −2.1,各 OD 对中可接受无座票和只接受有座票的旅客数如图 3 所示.

表 1　京沪高铁车站间距及列车运行时间

Tab.1　Inter-station distances and running times of the Beijing-Shanghai high-speed railway

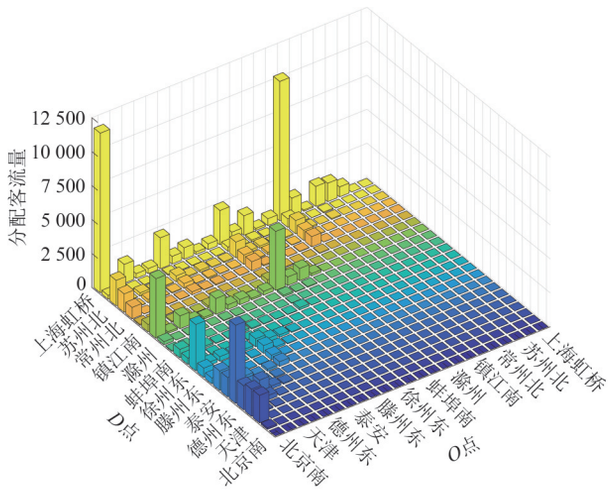
车站区间	站间距/km	运行时间/min
北京南—廊坊	59	21
廊坊—天津	72	18
天津—沧州西	88	22
沧州西—德州东	108	27
德州东—济南西	92	24
济南西—泰安	43	17
泰安—曲阜东	71	19
曲阜东—滕州东	56	17
滕州东—枣庄	36	13
枣庄—徐州东	63	18
徐州东—宿州东	79	19
宿州东—蚌埠南	77	23
蚌埠南—定远	53	16
定远—滁州	62	19
滁州—南京南	59	18
南京南—镇江南	69	20
镇江南—丹阳北	25	11
丹阳北—常州北	32	11
常州北—无锡东	57	17
无锡东—苏州北	26	10
苏州北—昆山南	32	11
昆山南—上海虹桥	43	18

初始方案为不考虑无座票的高铁列车开行方案.根据表 1 旅行时间、图 3 的总旅客需求及各类列车参数,依照“按流开车”的基本原则得到初始列车开行方案.

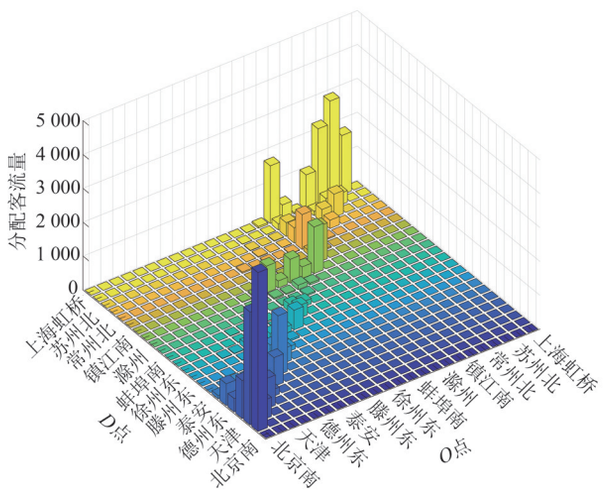
3.2　结果分析

采用遗传算法与 Gurobi 相结合的混合算法策略求解多目标非线性规划模型及票额分配问题,算法在 Matlab 软件上实现,设置遗传算法所需参数:初始种群规模为 800,迭代次数为 300 代,变异率设置为 0.3,交叉率设置为 0.9.适应度函数值迭代收敛曲线如图 4 所示,由图 4 可知:随着迭代次数的增加,平均适应度在不断降低,表明整体种群在不断优化,最终算法迭代至 150 代完成收敛.设计的求解算法整体收敛性良好,能有效求解高铁列车开行方案和票额分配优化问题.

最终生成各 OD 对中有座票和无座票票额分配如图 5 所示.由图 5 可知:优化后方案中无座票票额分配对象主要为北京—济南、徐州—南京、南京—上海等沿线邻站客流;共生成 117 928 张有座票、21 072 张



（a）只接受有座票客流需求



（b）可接受无座票客流需求

图 3　购买不同票型的旅客需求

Fig.3　Passenger demand for different ticket types

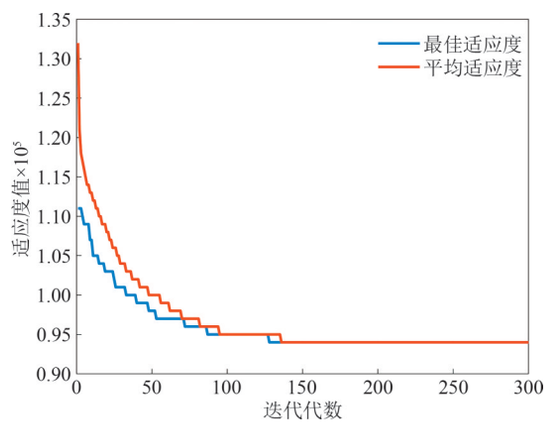
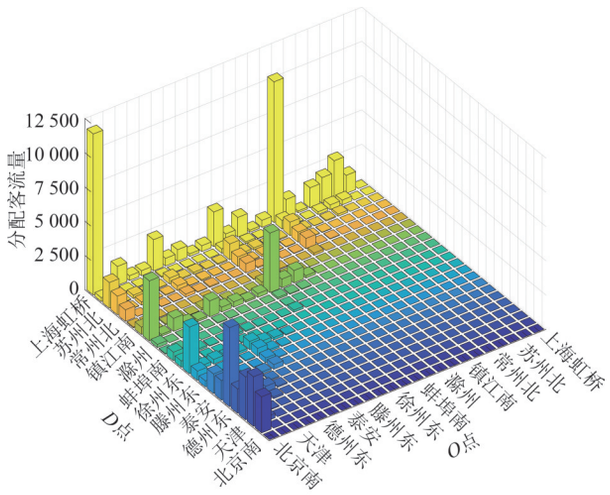


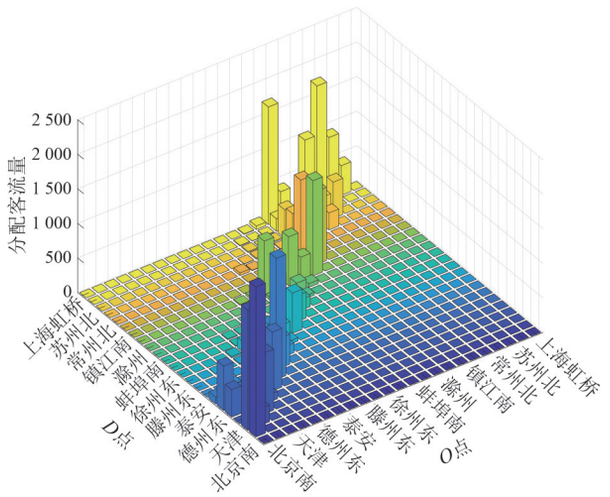
图 4　适应度函数迭代曲线

Fig.4　Iteration curves of fitness function

无座票，无座票占总出售票数的 15.16%；不考虑无座票的方案旅客总旅行时间为 19 493 248 min，考虑无座票的方案无座票旅客总旅行时间为 786 283 min，所有旅客总旅行时间为 18 879 210 min，优化了 3.15%.



（a）各OD有座票分配数量



（b）各OD无座票分配数量

图 5　购买不同票型的旅客数量

Fig.5　Number of passengers purchasing different ticket types

通过对比图 3 和图 5 可知，有座票的票额分配不仅全部满足只接受有座票旅客的客流需求，同时最大程度减少可接受无座票旅客购买无座票的情况. 这说明票额分配方案整体上与客流需求的匹配程度较高，即证明票额分配方案的合理性.

针对无座票主要服务的 OD 对，其优化前后票额分配数量对比如表 2 所示.

由表 2 可知，无座票主要服务对象为北京至济南、济南至泰安、徐州至南京、南京至上海区段的旅客，因此无需增开列车满足其出行需求. 与不考虑无座票条件下的方案相比，考虑无座票条件下的高铁列车开行方案减少了列车数量及停站次数. 两种情况的停站方案对比如图 6 所示，由图 6 可知：不考虑无座票的方案开行列车数为 54 列，车辆走行公里数为 1 124 928 km；考虑无座票的开行方案开行列车数为 50 列，车辆走行公里数为 1 034 797 km，铁路部门运营成本减少了 8.71%.

表 2　不同方案下的部分 OD 票额分配

Tab.2　Ticket allocation for selected OD pairs under different schemes

各 OD 对	不考虑无座票方案		优化方案	
	有座票数量	无座票数量	有座票数量	无座票数量
北京—廊坊	4 812	0	3 730	1 082
北京—天津	5 364	0	2 863	2 501
北京—济南	6 401	0	5 276	1 125
德州—济南	940	0	58	882
济南—泰安	1 752	0	138	1 614
枣庄—徐州	584	0	33	551
徐州—南京	5 128	0	4 400	728
滁州—南京	1 376	0	35	1 341
蚌埠—南京	1 612	0	887	725
南京—镇江	1 058	0	47	1 011
南京—常州	1 782	0	431	1 297
南京—上海	11 964	0	10 172	1 792
常州—上海	2 485	0	1 396	1 089
无锡—苏州	680	0	51	629
无锡—上海	3 586	0	1 762	1 824
苏州—上海	3 642	0	2 684	958
昆山—上海	1 750	0	1 272	478

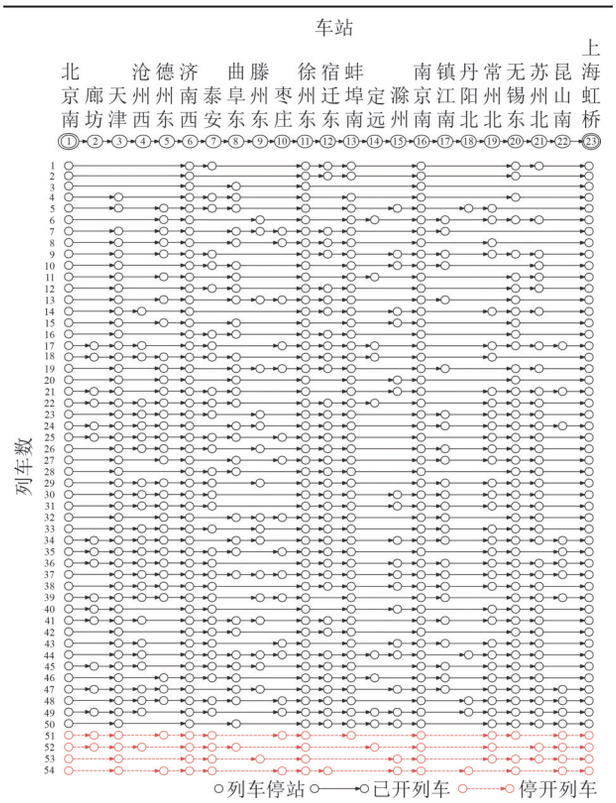


图 6　考虑无座票与不考虑无座票条件下的列车停站方案对比

Fig.6　Comparison of train stopping plans with and without unreserved tickets

4　结论

1）针对模型特点设计一种遗传算法嵌套 Gurobi 的方法进行求解.由于票额分配本质上是整数规划问题,利用 Gurobi 可以很好地得到客流分配结果.通过北京—上海高速铁路进行算例分析,当算法迭代至 150 代时收敛,求解时间相较于单一的启发式算法提高了 16.7%,验证了模型和算法的有效性.

2）优化结果表明,在可出售无座票条件下,高铁列车开行方案可以在优先保障长途旅客利益的前提下,最大程度上满足短途旅客的出行需求.然而,对于部分列车,优化后方案因出售无座票而增加了列车停站次数,导致列车上长途旅客的旅行时间有所增加,因此优化后方案旅客总旅行时间仅优化了 3.15%.

3）针对优化后的开行方案,无座票票额分配对象主要为北京—济南、济南—泰安、徐州—南京、南京—上海区段沿线客流,无需增开列车满足这部分旅客出行需求,因此生成列车开行方案相较于不考虑无座票的方案减少了 4 趟列车,铁路运营成本减少了 8.71%.票额分配方案整体与客流需求匹配度较高,能够满足所有旅客出行需求,一定程度上为铁路部门在可售无座票条件下的高铁列车开行方案优化提供决策依据.

在分析旅客是否接受无座票的影响因素时,主要考虑将旅客的旅行时间作为指标进行计算,实际上,影响因素还包括旅客自身属性如旅客年龄、舒适度偏好等,同时针对 Logit 模型的参数取值,本文是在单项调查的基础上得到相应的数据.对旅客进行细致分类,并实施详细的专项调查有待进一步研究.

参考文献(References):

[1] 孙国锋, 景云, 李和壁, 等. 基于旅客多维出行需求的列车开行方案与票价联合优化方法[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(6): 224－235.
SUN Guofeng, JING Yun, LI Hebi, et al. Joint optimization method of train line planning and ticket pricing based on multi-dimensional travel demand of passengers[J]. China Railway Science, 2024, 45(6): 224－235.(in Chinese)

[2] 胡怀宾, 聂磊, 付慧伶, 等. 区域高速铁路网列车开行方案调整优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 1540－1550.
HU Huaibin, NIE Lei, FU Huiling, et al. Adjustment and optimization of line plan for regional high-speed railway network[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(6): 1540－1550.(in Chinese)

[3] 张涛. 基于旅客出行满意度的高速铁路列车开行方案优化[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(3): 7－14.
ZHANG Tao. Optimization of train operation scheme

based on passenger travel satisfaction on high speed railway[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(3): 7－14.(in Chinese)

[4] 周文梁, 康静, 李莎, 等. 基于多日需求情景的高铁列车开行方案鲁棒优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 1810－1819.
ZHOU Wenliang, KANG Jing, LI Sha, et al. Robust optimization of high-speed railway train plan based on multiple demand scenarios[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1810－1819.(in Chinese)

[5] 龙品秀, 史峰, 胡心磊, 等. 不同需求日高铁列车开行方案协同优化方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 310－318.
LONG Pinxiu, SHI Feng, HU Xinlei, et al. The collaborative optimization of multi-day line plannings for high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 310－318.(in Chinese)

[6] ZHAO S, WU R F, SHI F. A line planning approach for high-speed railway network with time-varying demand[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: 107547.

[7] 代万清. 基于坐席类型动态分配的旅客列车开行方案研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2022.
DAI Wanqing. Research on passenger train operation plan based on dynamic seat-type allocation[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2022.(in Chinese)

[8] 姜春阳, 杨信丰, 李涛. 考虑席位类型的旅客列车开行方案优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(12): 9－16.
JIANG Chunyang, YANG Xinfeng, LI Tao. Optimization of passenger train operation scheme considering seat class[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(12): 9－16.(in Chinese)

[9] YAO Z Y, NIE L, FU H L. Railway line planning with passenger routing: Direct-service network representations and a two-phase solution approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2024, 186: 102989.

[10] 陈家祺. 考虑旅客出行行为的高速铁路动态定价与票额分配优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.
CHEN Jiaqi. Research on high-speed railway dynamic pricing and ticket allocation optimization considering passenger travel behavior[D].Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.(in Chinese)

[11] 雷洁. 考虑分段式方案的高速铁路席位控制建模与优化方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2023.
LEI Jie. Research on seat inventory control modeling and optimization methods for high-speed rail considering segmented strategies [D]. Hefei: Hefei University of Technology,2023.(in Chinese)

[12] HU X L, SHI F, XU G M, et al. Joint optimization of pricing and seat allocation with multistage and discriminatory strategies in high-speed rail networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 148: 106690.

[13] 李鑫杰, 刘斌, 田志强, 等. 考虑旅客分类的高速铁路票价与票额综合优化[J]. 深圳大学学报(理工版), 2025, 42(1): 105－112.
LI Xinjie, LIU Bin, TIAN Zhiqiang, et al. Comprehensive optimization of high-speed railway ticket pricing and quota considering passenger classification[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2025, 42(1): 105－112.(in Chinese)

[14] HETRAKUL P, CIRILLO C. A latent class choice based model system for railway optimal pricing and seat allocation[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 61: 68－83.

[15] 周文梁, 蒋志刚, 柴乃杰, 等. 高速铁路列车开行方案与票价票额综合优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 151－163.
ZHOU Wenliang, JIANG Zhigang, CHAI Naijie, et al. Comprehensive optimization of line planning, ticket pricing and seat allocation of high-speed railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(3): 151－163.(in Chinese)

[16] 赵翔, 武晋飞, 单杏花. “一日一图”模式下高速列车开行方案与票额分配协同优化方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 10－17.
ZHAO Xiang, WU Jinfei, SHAN Xinghua. Collaborative optimization of high-speed train line planning and seat allocation under“daily train timetabling”[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(8): 10－17.(in Chinese)

[17] 李翔. 融合票价与票额决策的高铁列车开行方案优化[D]. 长沙:中南大学,2023.
LI Xiang. Optimization of high-speed railway train operation plan integrating pricing and seat allocation decisions[D]. Changsha:Central South University,2023.(in Chinese)