

DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2017.05.035

考虑旅客旅行时间的高速铁路票额分配

宋文波¹ 赵鹏¹ 李博¹ 王盼²

(¹ 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

(² 成都铁路局绵阳车务段, 绵阳 621000)

摘要: 针对列车间相互替代性、差异性及旅客选择行为对票额分配的影响,利用旅客疲劳恢复时间对列车舒适度进行定量化研究,在考虑列车运行时间、舒适度、停站方式差异性的基础上,以铁路部门和旅客的系统效益最大化为目标,构建考虑旅客旅行时间的高速铁路多列车票额分配随机非线性整数规划模型,并设计模拟退火求解算法.以京沪高铁列车为对象进行实例分析,并与只考虑铁路收益下的票额分配方案对比,结果表明:考虑旅客旅行时间的票额分配方案能在保证铁路收益提升约 2.3% 的前提下,使得旅客旅行时间和旅行成本均降低约 3.6%,铁路部门和旅客的系统效益提高约 7.1%,并且能够更好地满足长途旅客的出行需求.所构建模型能够为高速铁路多列车的票额分配提供优化方法.

关键词: 高速铁路;票额分配;旅客旅行时间;模拟退火算法;多列车

中图分类号: U293.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2017)05-1062-07

High-speed railway ticket allocation considering passenger travel time

Song Wenbo¹ Zhao Peng¹ Li Bo¹ Wang Pan²

(¹ School of Traffic Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(² Mianyang Train Operation Depot, Chengdu Railway Bureau, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the influences of substitutability, difference and passenger choice behavior on ticket allocation, the comfort of the train was quantified by the fatigue recovery time of passengers. Considering the differences of the running time, comfort and stop plan of the train, the stochastic nonlinear integer programming model for ticket allocation of multiple high-speed trains was formulated by taking into account the passenger travel time for maximizing the system revenue of the railway company and the passenger. The simulated annealing algorithm was designed to solve the model and a case study was carried out with the Beijing-Shanghai high-speed trains as an example. Compared with the ticket allocation scheme under the condition of maximizing the revenue of railway company, the results show that the revenue of railway company has an improvement of about 2.3%, the passenger travel time and the passenger travel cost are both reduced by about 3.6%, the system revenue of the railway company and passengers is increased by about 7.1% and the travel demand of long-haul passengers is better satisfied through the ticket allocation scheme considering the passenger travel time. The proposed model can provide an optimization method for the ticket allocation of multiple high-speed trains.

Key words: high-speed railway; ticket allocation; passenger travel time; simulated annealing algorithm; multiple trains

收稿日期: 2017-04-01. 作者简介: 宋文波(1991—),男,博士生;赵鹏(联系人),男,博士,教授,博士生导师,pzhao@bjtu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(U1434207)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016YJS070)、中国铁路总公司科技研究开发计划资助项目(2015X006-G).

引用本文: 宋文波,赵鹏,李博,等.考虑旅客旅行时间的高速铁路票额分配[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(5):1062-1068.

DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2017.05.035.

高速铁路票额分配是在列车开行方案的基础上,将列车席位能力分配到沿途各乘降站以满足旅客出行需求的运输计划.合理分配高铁线路上各列车的票额对提高运输收益、满足旅客快速出行需求具有重要意义.

对于票额分配问题,国内外学者已经做了深入的研究^[1-10].在单列车的票额分配研究中,文献[1]首次提出铁路席位控制问题是一个多区段、单一票价的收益管理问题,并针对需求特点建立了确定性线性规划和概率性非线性规划模型.文献[2]在文献[1]的基础上将旅客需求分为全价票和折扣票需求,研究了两等级票价、多区段的单列车席位控制问题.文献[3]研究了考虑通售席位下的旅客列车票额分配方法.文献[4-5]研究了高速铁路嵌套式票额分配方法和随机需求下的单列车票额分配方法.文献[6]基于旅客 buy-up 行为,研究了两等级票价、多区段、单列车的嵌套式票额分配方法.在多列车的票额分配研究中,文献[7]在短时客流需求预测的基础上,研究了考虑限售和不考虑限售的高速铁路票额分配及调整模型.文献[8]以收益最大化为目标研究了多列车多停站方案下的高速铁路票额分配模型.文献[9]建立了列车票额分配与发车间隔一体化模型,研究多区段、多车次的旅客列车票额分配方法.在考虑旅客选择行为的票额分配研究中,文献[10]将列车运行时间、舒适度作为选择属性来构建多项 logit 模型并对需求进行分类,进而建立旅客选择行为下的单阶段和多阶段随机票额分配模型.

但是,目前对旅客列车票额分配的研究,通常以铁路部门收益最大化为目标^[1-10],并且大部分集中在对单列车的票额分配方法研究中^[1-6],没有考虑高铁线路上列车间的相互替代性和差异性及其旅客对列车的选择行为.然而在实际运输组织过程中,高铁线路上通常运行多趟列车,这些列车在运行时间、舒适度及停站方式上存在一定差异性,同时由于服务部分相同 OD 列车间也存在一定相互替代性.此外,由于目前我国高速铁路列车无论运行速度是否相同,只要运行距离相同票价均相同,这就使得同一 OD 的旅客在选择高铁出行时,通常会选择运行速度较快的列车以达到快速出行的目的.

本文针对高铁线路上列车间的差异性和相互替代性及其旅客对列车的选择行为,以铁路部门和旅客的系统效益最大化为目标建立随机需求下的考虑旅客旅行时间的票额分配非线性整数规划模型,并设计模拟退火算法对模型进行求解,从而制

定高铁线路上各列车的票额分配方案,提高铁路收益及其旅客的出行速度.

1 影响因素分析

目前,我国高铁线路上通常开行多趟列车,这些列车间存在一定差异性和相互替代性.列车间的差异性对旅客选择列车出行具有一定影响,对于发车时间相近的列车,旅客在选择高铁列车出行时,由于票价相同,主要受列车运行时间、舒适度的影响.并且由于列车间存在差异性使得不同的票额分配方案对铁路部门和旅客所产生的效益也不同.因此,在对高铁线路上列车进行票额分配时要综合考虑列车间的差异性.

1.1 列车差异性分析

对于发车时间相近的高铁列车,其停站方案主要有3种基本模式:大站停列车、交错停列车、站站停列车^[8],列车停站方式的差异直接导致列车运行时间和舒适度之间的差异.旅客乘坐列车的舒适度通常作为定值给出^[10],然而旅客乘坐同一列车时旅行距离不同舒适度也不同,因此本文利用疲劳恢复时间来衡量旅客乘车的舒适度,疲劳恢复时间越长舒适度越差,疲劳恢复时间占用了旅客的时间价值,因此要将其计入旅客旅行时间内^[11],其计算公式如下:

$$g_u(t) = \frac{M}{1 + a_u e^{-b_u t}} \quad (1)$$

式中, M 为极限疲劳恢复时间; a_u 和 b_u 为乘车类别为 u 时的无量纲参数; t 为列车运行时间.由于本文研究对象为高速列车,根据文献[11]各参数分别取值为 $M = 15 \text{ h}$, $a_u = 59$, $b_u = 0.28$.

1.2 列车差异性对票额分配影响

对于发车时间相近的多趟列车,列车能力是固定的且短期内不发生变化,将有限的列车席位能力分配到高铁线路沿途车站,可以产生多种票额分配方案,不同的票额分配方案将产生不同的收益.如图1所示,假设一高铁线路上共有A、B、C、D四个车站,运行2趟高铁列车,分别为列车1和列车2.假设2列列车在各站的停站时间均为2 min,各OD客流需求、票价、列车运行时间、旅客疲劳恢复时间如表1所示.

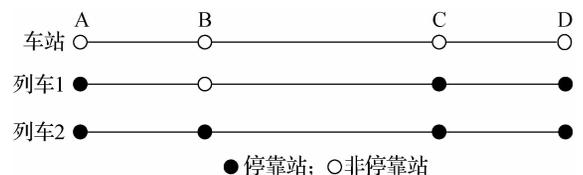


图1 高铁线路列车开行方案

表 1 各 OD 需求及列车参数

OD	需求人数	票价/元	运行时间/min		疲劳恢复时间/min	
			列车 1	列车 2	列车 1	列车 2
AB	600	100		65		20.2
AC	600	250	150	200	29.7	37.2
AD	600	350	210	270	38.9	50.7
BC	300	200		133		27.5
BD	300	250		203		37.7
CD	600	100	58	68	19.6	20.5

表 1 中各列车的运行时间包括列车在各站的停站时间. 根据表 1 中各 OD 客流需求及列车席位能力,可以得到 5 种可行的票额分配方案,如表 2 所示. 其中,方案 1 和方案 2 中 2 列列车的定员均为 1 200 人,方案 3、方案 4 和方案 5 中 2 列列车定员均为 600 人.

表 2 票额分配方案

OD	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	列 1	列 2	列 1	列 2	列 1	列 2	列 1	列 2	列 1	列 2
AB		600	600		300	300		0		
AC	600	0	600	0	0	300	300	0	300	300
AD	600	0	300	300	600	0	300	300	300	300
BC		300	300		300	300		0		
BD		300	300		0	0		0		
CD	600	0	600	0	0	600	300	300	300	300
铁路部门 收益/万元	61.5		61.5		43.5		43.5		42.0	
旅客旅行 时间/h	7 919.5		8 278.8		5 788.1		5 805.4		5 762.8	

表 2 中旅客旅行时间包括列车运行时间和旅客疲劳恢复时间. 从表 2 可以看出,方案 1 和方案 2 中列车的席位能力能够满足所有 OD 旅客的需求,旅客运输市场处于供大于求的状态. 由于 2 列列车在各 OD 的票价相同,两方案满足的旅客需求又相同,使得两方案所获得的收益相同,但是方案 1 的旅客旅行时间小于方案 2. 因此对于铁路部门而言,在两方案收益相同的情况下,选择旅客旅行时间小的方案更能满足旅客出行需求. 方案 3、方案 4 和方案 5 中列车的席位能力不能满足所有旅客的需求,旅客运输市场处于供不应求的状态. 不同的票额分配方案将会产生不同的收益和旅客旅行时间,方案 3 和方案 4 所满足的旅客需求相同,两方案所获得的收益相同,但是两方案的旅客旅行时间不同;方案 3 和方案 4 的收益比方案 5 大,但是旅客所需的旅行时间也长. 通过上述分析可以看出无论客流需求如何,在对高铁线路上列车进行票额分配时,综合考虑列车运行时间、旅客疲劳恢复时间、列车停站方式、铁路收益等因素对于优化票额分配方案具有重要意义.

2 模型构建

假设某高铁线路上有 s 个车站, (m, n) 表示从 <http://journal.seu.edu.cn>

m 站到 n 站的 OD 对, $m = 1, 2, \dots, s - 1, n = m + 1, m + 2, \dots, s$; 根据高铁线路上列车的发车时间将所有列车分为 K 个集合, 集合 $k = 1, 2, \dots, K$, 每个集合 k 内列车的发车时间相近, 列车差别主要在于列车运行时间、舒适度及停站方式. 本文在综合考虑列车运行时间、舒适度及停站方式差异性的基础上, 以铁路部门和旅客的系统效益最大化为目标来构建模型.

本文假设各 OD 客流需求服从独立正态分布^[1], 则 OD 对 (m, n) 客流需求的概率密度函数为

$$f_{mn}(x) = \frac{\exp\left(-\frac{(x - \mu_{mn})^2}{2\sigma_{mn}^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{mn}} \quad 1 \leq m < n \leq s \quad (2)$$

式中, μ_{mn} 和 σ_{mn} 分别为正态分布的均值和标准差.

在构建模型时需要计算列车在各 OD 上的运行时间, 其计算公式为

$$r_i^{mn} = a_i^n - d_i^m \quad (3)$$

式中, 下标 i 表示集合 k 内的列车, $i = 1, 2, \dots, l_k$; d_i^m 表示列车 i 从 m 站出发的时刻; a_i^n 表示列车 i 到达 n 站的时刻.

票额分配模型通常以铁路部门收益最大化为目标, 不考虑旅客选择行为^[1-10]. 根据各 OD 客流需求, 铁路部门在 OD 对 (m, n) 的客票期望销售量 S_{mn} 表示为

$$S_{mn} = \int_0^{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}} x f_{mn}(x) dx + \sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn} \int_{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}}^{\infty} f_{mn}(x) dx \quad (4)$$

式中, x_i^{mn} 表示列车 i 在 OD 对 (m, n) 上分配的票额, 为决策变量. 因此, 铁路部门在不考虑旅客选择行为时, 期望收益最大化的目标函数为

$$\max z_1 = \sum_{(m,n)} p_{mn} S_{mn} = \sum_{(m,n)} p_{mn} \left(\int_0^{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}} x f_{mn}(x) dx + \sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn} \int_{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}}^{\infty} f_{mn}(x) dx \right) \quad (5)$$

式中, p_{mn} 表示 OD 对 (m, n) 的票价.

旅客在选择高铁列车出行时, 为了达到快速出行的目的通常会选择运行速度较快的列车, 因此为了保证旅客快速出行, 在进行票额分配时以所有旅客的旅行时间最小化作为目标函数. 因此当各列车在 OD 对 (m, n) 的票额分配量为 x_i^{mn} 时, 可以得到最小化的旅客旅行时间为

$$\min z_2 = \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} r_i^{mn} + \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} g_i^{mn}(r_i^{mn}) \quad (6)$$

式中, $g_i^{mn}(r_i^{mn})$ 表示从 m 站到 n 站的旅客选择列车 i 时的疲劳恢复时间. 将式(6)转化为费用形式并进行最大化, 得

$$\max z_2 = -v \left(\sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} r_i^{mn} + \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} g_i^{mn}(r_i^{mn}) \right) \quad (7)$$

式中, v 为旅客的单位旅行时间价值. 综合考虑铁路部门和旅客的系统效益, 本文目标函数如下:

$$\max (z_1 + z_2) = \sum_{(m,n)} p_{mn} \left(\int_0^{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}} x f_{mn}(x) dx + \sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn} \cdot \int_{\sum_{i=1}^{l_k} x_i^{mn}}^{\infty} f_{mn}(x) dx \right) - v \left(\sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} r_i^{mn} + \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} g_i^{mn}(r_i^{mn}) \right) \quad (8)$$

对高铁线路上的列车进行票额分配时, 必须满足如下约束:

1) 能力约束. 列车在各 OD 分配的票额不能超过列车在各区段的席位能力, 在不考虑列车超员的情况下, 列车在各区段的席位能力等于列车定员 C_i , 即

$$\sum_{m=1}^h \sum_{n=m+1}^s x_i^{mn} \leq C_{ih} \quad \forall i = 1, 2, \dots, l_k; h = 1, 2, \dots, s-1 \quad (9)$$

式中, h 表示线路上的区段, $h = 1, 2, \dots, s-1$; C_{ih} 表示列车 i 在区段 h 上的席位能力.

2) 列车服务约束. 各列车只能服务其停站之间的 OD 且只在各停站之间存在运行时间, 即

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mn} \geq 0, r_i^{mn} > 0 \quad \tau_i^{mn} = 1 \\ x_i^{mn} = 0, r_i^{mn} = c \quad \tau_i^{mn} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, τ_i^{mn} 为参数, 其值由列车的停站方案决定, 如果列车 i 在车站 m 和车站 n 均停站则取值为 1, 否则取值为 0; c 为一个较大的常数, 保证列车不服务的 OD 不分配票额.

3) 决策变量约束. 列车分配的票额必须满足整数约束, 即

$$x_i^{mn} \in \mathbf{Z} \quad (11)$$

式(8) ~ (11) 构成了考虑旅客旅行时间的高速铁路票额分配模型, 分别对每个集合 k 内的列车求解上述模型即可得到高铁线路上所有列车的票额分配方案, 即 x_i^{mn} 值.

3 求解算法

由于本文所提出的考虑旅客旅行时间的高速铁路票额分配模型是带约束的随机非线性整数规划问题, 利用现有的优化软件很难求解, 并且在实际问题中对求解的效率通常要求较高, 因此为了快速求解, 本文采用模拟退火算法对上述模型进行求解.

3.1 初始解的生成

由于模型中的需求为随机需求, 将随机需求用正态分布的均值代替, 则可以将模型转化为确定需

求下的线性整数规划模型, 如模型 M1 所示:

$$\max \left[\sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} p_{mn} x_i^{mn} - v \left(\sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} r_i^{mn} + \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} g_i^{mn}(r_i^{mn}) \right) \right] \quad (12)$$

s. t.

$$\sum_{m=1}^h \sum_{n=m+1}^s x_i^{mn} \leq C_{ih} \quad \forall i = 1, 2, \dots, l_k; h = 1, 2, \dots, s-1 \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{(m,n)} x_i^{mn} \leq \mu_{mn} \\ m = 1, 2, \dots, s-1; n = m+1, m+2, \dots, s \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mn} \geq 0, r_i^{mn} > 0 \quad \tau_i^{mn} = 1 \\ x_i^{mn} = 0, r_i^{mn} = c \quad \tau_i^{mn} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$x_i^{mn} \in \mathbf{Z} \quad (16)$$

利用 Lingo12.0 求解线性整数规划模型 M1, 得到的解 S_0 作为模拟退火算法的初始可行解, 其中初始可行解 S_0 为 l_k 行 $s(s-1)/2$ 列的矩阵, 每 1 行表示一列列车的票额分配方案, 每 1 列表示一个 OD.

3.2 算法

模拟退火求解算法步骤如下:

① 设置算法参数, 初始温度 T_0 , 令 $T = T_0$, 终止温度 T_{end} , 确定每个 T 时的迭代次数, 即 Metropolis 链长 L , 给定降温参数 $\alpha, p = 1, q = 0$.

② 利用 Lingo12.0 求解线性整数规划模型 M1 得到初始可行解 S_0 , 令 $S_1 = S_0$.

③ 随机产生一个 $1 \sim l_k$ 之间的整数 i , 随机产生一个 1 行 $s(s-1)/2$ 列的矩阵 ΔS_1 , 矩阵的各分量服从 $(-r, r)$ 上的均匀分布, r 为整数, 其大小可根据实际情况确定, 其中矩阵 S_1 和 ΔS_1 的列数相同, 均为 j . 令 $S_2 = S_1$, 若 $S_1(i, j) + \Delta S_1(1, j) \geq 0$, 则 $S_2(i, j) = S_1(i, j) + \Delta S_1(i, j)$, 由此可以产生新解 S_2 .

④ 判断新解 S_2 是否满足约束式(9), 若满足则转至⑤, 否则转至⑦.

⑤ 利用式(8) 计算目标函数值 $f(S_1), f(S_2)$ 及其新解 S_2 的增量 $df = f(S_2) - f(S_1)$.

⑥ 根据 Metropolis 准则判断是否接受新解. 当 $df > 0$ 时, 则接受新解 S_2 , 即 $S_1 = S_2$; 否则计算 S_2 的接受概率 $\exp(df/T)$, 即随机产生 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数 ξ , 若 $\exp(df/T) > \xi$, 接受新解 S_2 , 即 $S_1 = S_2$; 否则保留当前解 S_1 .

⑦ $p = p + 1$.

⑧ 若 $p \leq L$, 转至③, 否则转至⑨.

⑨ 温度下降, $T_{q+1} = \alpha T_q, T = T_{q+1}, q = q + 1$.

⑩ 算法终止检验. 若 $T < T_{\text{end}}$ 则输出当前解 S_1 , 结束程序; 否则令 $p = 1$, 转至③.

4 实例分析

4.1 基础数据

以京沪高铁为例,G13,G119 为一集合内的 2 列车,G13 发车时间为 10:00,运行时间为 4 h 55 min; G119 发车时间为 10:05,运行时间为 5 h 42 min. 本文以 2 列列车的二等座为例进行实例分析,京沪

高铁线路上的车站及 2 列列车的停站方案如图 2 所示,2 列列车共同服务 45 个 OD,设 2 列列车的二等座车厢定员均为 871 人. 以 2015-07-20—2015-07-26 两列列车二等座的客流数据为基础,统计各 OD 均值和标准差,并根据列车运行图和式(1)计算得到各列车在各 OD 的运行时间以及旅客乘坐各列车时在各 OD 的疲劳恢复时间.

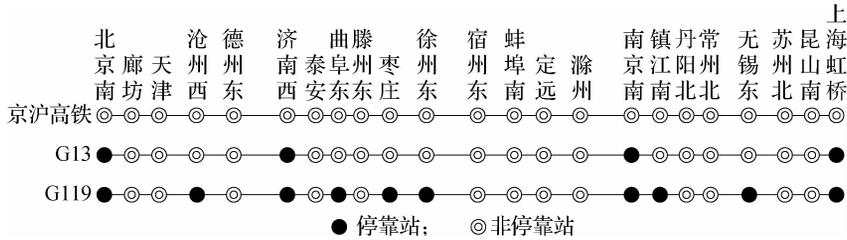


图 2 京沪高铁线路及列车停站方案

4.2 收益分析

利用 Lingo12.0 对线性整数规划模型 M1 求解得到模拟退火算法的初始解,并利用 Matlab 编程实现本文算法,算法中初始温度 $T_0 = 100\ 000$,终止温度 $T_{end} = 10^{-6}$,链长 $L = 200$,降温参数 $\alpha = 0.95$. 根据文献[12]旅客的单位旅行时间价值 $v = 0.6$ 元/min. 利用本文提出的模型和算法对 2 列列车的票额分配方案进行优化,迭代过程如图 3 所示. 本文以只考虑铁路部门收益的票额分配方案作为对比方案,因此根据本文模型得到的 G13,G119 的票额分配方案及其对比方案分别如表 3 和表 4 所示,

表 4 G119 各 OD 票额分配数量

上车站	下车站	本文方案	对比方案
北京南	沧州西	53	83
北京南	济南西	124	126
北京南	曲阜东	33	60
北京南	枣庄	12	14
北京南	徐州东	67	65
北京南	南京南	130	216
北京南	镇江南	37	48
北京南	无锡东	109	0
北京南	上海虹桥	301	252
沧州西	济南西	5	28
沧州西	曲阜东	6	8
沧州西	枣庄	2	5
沧州西	徐州东	1	1
沧州西	南京南	8	11
沧州西	镇江南	5	5
沧州西	无锡东	14	20
沧州西	上海虹桥	16	11
济南西	曲阜东	26	78
济南西	枣庄	18	16
济南西	徐州东	12	2
济南西	南京南	9	18
济南西	镇江南	3	3
济南西	无锡东	14	13
济南西	上海虹桥	13	24
曲阜东	枣庄	6	68
曲阜东	徐州东	5	0
曲阜东	南京南	4	2
曲阜东	镇江南	3	7
曲阜东	无锡东	17	15
曲阜东	上海虹桥	48	50
枣庄	徐州东	2	54
枣庄	南京南	10	6
枣庄	镇江南	1	1
枣庄	无锡东	6	4
枣庄	上海虹桥	35	42
徐州东	南京南	12	25
徐州东	镇江南	6	9
徐州东	无锡东	9	13
徐州东	上海虹桥	61	70
南京南	镇江南	66	123
南京南	无锡东	31	32
南京南	上海虹桥	5	46
镇江南	无锡东	109	75
镇江南	上海虹桥	36	203
无锡东	上海虹桥	41	76
汇总		1 531	2 028

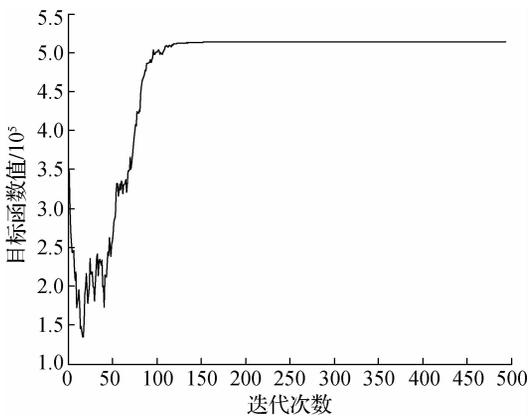


图 3 迭代优化过程

表 3 G13 各 OD 票额分配数量

上车站	下车站	本文方案	对比方案
北京南	济南西	18	18
北京南	南京南	285	194
北京南	上海虹桥	567	657
济南西	南京南	2	1
济南西	上海虹桥	17	19
南京南	上海虹桥	111	117
汇总		1 000	1 006

两方案收益对比情况如表5所示。

表5 两方案收益对比

方案	本文方案	对比方案
铁路收益/万元	89.4	87.4
旅客旅行时间/h	10 527.8	10 916.7
旅客旅行成本/万元	37.9	39.3
系统效益/万元	51.5	48.1

从表5可以看出,相比不考虑旅客旅行时间的票额分配方案,利用本文提出的模型得到的方案,可以在保证铁路部门收益提升约2.3%的同时,使旅客旅行时间和旅行成本均降低约3.6%,铁路部门和旅客的系统效益提高约7.1%,从而验证本文所提方法的合理性和有效性。

4.3 区段上座率分析

根据表3和表4两列列车的票额分配方案及其对比方案,可以得到2列列车能够满足的各OD的客流需求,进而得到各列车在各区段的客流量和上座率,分别如表6和表7所示。

表6 G13在各区段的客流量及上座率

区段	客流量		上座率/%	
	本文方案	对比方案	本文方案	对比方案
北京南—济南西	870	869	99.9	99.8
济南西—南京南	871	871	100	100
南京南—上海虹桥	695	793	79.8	91.0

表7 G119在各区段的客流量及上座率

区段	客流量		上座率/%	
	本文方案	对比方案	本文方案	对比方案
北京南—沧州西	866	864	99.4	99.2
沧州西—济南西	870	870	99.9	99.9
济南西—曲阜东	836	870	96.0	99.9
曲阜东—枣庄	854	866	98.0	99.4
枣庄—徐州东	870	870	99.9	99.9
徐州东—南京南	871	865	100	99.3
南京南—镇江南	800	788	91.8	90.5
镇江南—无锡东	824	870	94.6	99.9
无锡东—上海虹桥	556	774	63.8	88.9

从表3和表4可以看出,本文方案中2列列车能够满足的总客流为2 531人,对比方案中2列列车能够满足的总客流为3 034人。从表6和表7可以看出,本文方案和对比方案中2列列车的席位能力利用率均比较高,而本文方案满足的客流较对比方案少了503人,这是由于目前我国高速铁路票价率是递远递减的,在对比方案中,目标函数是铁路部门收益最大化,这就使得所得到的方案可能会满足更多旅途较短的旅客,从而也说明了本文模型能够更好地满足旅途较长的旅客。

5 结论

1) 本文通过对高铁线路上列车在运行时间、

舒适度及停站方式上的差异性及其服务OD上的相关替代性进行分析,构建了考虑旅客旅行时间的高速铁路多列车的票额分配模型,并根据模型特点设计模拟退火求解算法,最后以京沪高铁列车为例进行分析。

2) 利用本文模型得到的票额分配方案能够在铁路收益提升约2.3%的同时,使得旅客旅行时间和旅行成本均降低约3.6%,铁路部门和旅客的系统效益提高约7.1%;并且能够更好地满足长途旅客的需求。

3) 本文研究中仅考虑高铁线路上列车的票额分配,未来将进一步研究高铁网络的票额分配方法,同时列车的始发、终到时间对票额分配的影响也需要进一步进行研究。

参考文献 (References)

- [1] Ciancimino A, Inzerillo G, Lucidi S, et al. A mathematical programming approach for the solution of the railway yield management problem[J]. *Transportation Science*, 1999, 33(2): 168-181. DOI:10.1287/trsc.33.2.168.
- [2] You P S. An efficient computational approach for railway booking problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(2): 811-824. DOI:10.1016/j.ejor.2006.12.049.
- [3] 骆泳吉,刘军,赖晴鹰.考虑通售席位的旅客列车票额优化方法[J].铁道学报,2016,38(5):11-15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.05.002. Luo Yongji, Liu Jun, Lai Qingying. Optimization of seat inventory allocation for passenger trains with first-come-first-serve seats [J]. *Journal of China Railway Society*, 2016, 38(5): 11-15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.05.002. (in Chinese)
- [4] 包云,刘军,马敏书,等.高速铁路嵌套式票额分配方法研究[J].铁道学报,2014,36(8):1-6. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.08.001. Bao Yun, Liu Jun, Ma Minshu, et al. Nested seat inventory control approach for high-speed trains [J]. *Journal of China Railway Society*, 2014, 36(8): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.08.001. (in Chinese)
- [5] 包云,刘军,刘江川,等.基于随机需求的单列车票额分配方法[J].中国铁道科学,2015,36(2):96-102. DOI:10.3969/j.issn.1001-4632.2015.02.14. Bao Yun, Liu Jun, Liu Jiangchuan, et al. Seat allotment method for single train based on stochastic demand [J]. *China Railway Science*, 2015, 36(2): 96-102. DOI:10.3969/j.issn.1001-4632.2015.02.14. (in Chinese)
- [6] 钱丙益,帅斌,陈崇双,等.基于旅客buy-up行为的

- 铁路客运专线收益管理模型[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 10 - 15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2013.08.002.
- Qian Bingyi, Shuai Bin, Chen Chongshuang, et al. Revenue management model for dedicated passenger line based on passengers' buy-up behavior [J]. *Journal of China Railway Society*, 2013, **35**(8): 10 - 15. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.08.002. (in Chinese)
- [7] Jiang X, Chen X, Zhang L, et al. Dynamic demand forecasting and ticket assignment for high-speed rail revenue management in China [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015, **2475**: 37 - 45. DOI:10.3141/2475-05.
- [8] 赵翔, 赵鹏, 李博. 多列车多停站方案条件下高速铁路票额分配研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(11): 9 - 15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.11.002.
- Zhao Xiang, Zhao Peng, Li Bo. Study on high-speed railway ticket allocation under conditions of multiple trains and multiple train stop plans [J]. *Journal of China Railway Society*, 2016, **38**(11): 9 - 15. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.11.002. (in Chinese)
- [9] 蓝伯雄, 张力. 高速铁路客运专线的收益管理模型[J]. 中国管理科学, 2009, 17(4): 53 - 59.
- Lan Boxiong, Zhang Li. Revenue management model for high-speed passenger railway [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, **17**(4): 53 - 59. (in Chinese)
- [10] Wang X, Wang H, Zhang X. Stochastic seat allocation models for passenger rail transportation under customer choice [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, **96**: 95 - 112. DOI:10.1016/j.tre.2016.10.003.
- [11] 夏阳. 客运专线运输组织相关问题研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2005.
- [12] 缪文琳, 倪少权, 庞婷, 等. 基于时段划分的城际列车开行频率优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(3): 7 - 11. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2017.03.02.
- Miao Wenlin, Ni Shaoquan, Pang Ting, et al. Study on optimizing operation frequency of inter-city trains based on period division [J]. *Railway Transport and Economy*, 2017, **39**(3): 7 - 11. DOI:10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2017.03.02. (in Chinese)