

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.04.07

# 考虑运营收益与车厢空间感知的轨道列车 发车间隔优化

朱顺应<sup>1</sup>, 刘 滨<sup>1</sup>, 刘 斌<sup>2</sup>, 杨友珍<sup>3</sup>, 王 红<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 交通学院 湖北 武汉 430063; 2. 武汉地铁运营有限公司 湖北 武汉 430019;  
3. 武汉轨道交通运营管理办公室 湖北 武汉 430019)

**摘要:** 轨道交通系统中运营收益与乘客车厢空间感知度是一种对立关系, 通过研究该两因素对轨道发车间隔进行优化, 能够实现合理收益范围内提升乘客车厢空间感知。考虑列车上下行两方向影响以及乘客候车时间、供需平衡、最大载客量、配备车辆数、列车运行安全间隔等方面的约束, 建立发车间隔优化模型, 采用遗传算法求解多变量非线性优化问题, 得到不同子时间段的优化方案。应用模型对武汉市轨道交通 4 号线高峰期间不同时段优化计算, 发现轨道发车间隔调整后, 运营收益小幅度下降能够有效提升车厢空间感知度; 并通过客流敏感性分析, 研究客流量按一定幅度提升下轨道运营收益与乘客车厢空间感知度的变化规律, 可为城轨列车运营决策提供参考。

**关键词:** 交通运输工程; 轨道交通; 发车间隔; 运营收益; 车厢空间感知度; 遗传算法

中图分类号: U292.4; U492.4<sup>+</sup> 12

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2021) 04-041-07

## Optimization of the Departure Interval of Urban Rail Train Considering Operational Income and Passenger Compartment Space Perception

ZHU Shunying<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>, YANG Youzhen<sup>3</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., Wuhan 430019, Hubei, China; 3. Wuhan Rail Transit Operation and Management Office, Wuhan 430019, Hubei, China)

**Abstract:** The operation income and the passenger compartment space perception of the rail transit system is an opposite relationship. Through the study of these two factors to optimize the departure interval of rail transit, the passenger compartment space perception could be improved within a reasonable income range. Considering the influence of the train's upstream and downstream direction and the constraint of factors such as passenger waiting time, supply and demand balance, maximum passenger capacity, number of vehicles equipped and the safety interval of train operation, the departure interval optimization model was established, and the genetic algorithm was used to solve the multi-variable nonlinear optimization problem. The optimization schemes of different sub-periods were obtained. The proposed method was applied to optimize and calculate Wuhan Rail Transit Line 4 during different periods of peak hours. It is found that after the adjustment of the transit departure interval, the small decrease of operation income can effectively improve the passenger compartment space perception. Through passenger flow sensitivity analysis, the change law of rail operation income and passenger compartment space perception under the condition of passenger flow increasing to a certain extent is studied, which can provide reference for the decision-making of urban rail train operation.

**Key words:** traffic and transportation engineering; rail transit; departure interval; operational income; passenger compartment space perception; genetic algorithm

收稿日期: 2019-12-05; 修订日期: 2020-02-25

第一作者: 朱顺应(1967—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: 237842@whut.edu.cn

通信作者: 刘 滨(1996—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: 15172426330@163.com

0 引 言

轨道交通是缓解大城市交通拥挤的重要客运载体,影响着整个城市运转效率,发车间隔对整个轨道系统影响至关重要。如何对其优化改进,增强轨道交通吸引力是目前研究的难点问题。目前研究大多数局限于单一影响因素,优化目标也主要集中于运营收益与客流供需平衡方面,未深入研究轨道运营公司与车厢空间感知之间的关系。车厢空间感知即乘客乘坐轨道交通,对于车厢拥挤的主观感受<sup>[1]</sup>,反映乘客的乘车体验,直接关系到轨道交通吸引力。运营公司希望在满足客流需求条件下获得最大收益,尽可能地提升列车周转量与满载率,降低车厢空间体验与运营成本。而通过对目前城市轨道交通发展现状与趋势研究<sup>[2]</sup>,轨道交通已经成为了居民出行首选方案,每年剧增的轨道客流量给运营公司带来了极大的挑战,乘客对出行环境的要求越来越高,“兼顾效益,乘客为本”理念由此产生<sup>[3]</sup>,在维持轨道运营收益的同时,提高乘车环境,给予乘客良好车厢空间感知的前提下,需要增加一定的运营投入。宋瑞等<sup>[4]</sup>以列车运行折返和客流量约束为条件,构建了轨道交通运营计划优化模型;刘东晓等<sup>[5]</sup>以候车人数和单位成本最优为目标,考虑列车客流量条件对高峰时段发车间隔影响进行模糊规划求解,忽视了列车安全运行限制;W.BEHIR 等<sup>[6]</sup>从

战略及运营公司利益最大化角度采用启发式算法求解;X.GHO 等<sup>[7]</sup>探讨了过渡期列车车头时距与乘客需求的变化,但未考虑车辆配备计划的影响。以上研究均未从车厢空间感知做进一步研究,车厢空间感知直接与乘客密度相关,A.TIRACHINI 等<sup>[8]</sup>认为过低的车厢空间感知会导致身体不适,增加乘客心理负担,进而影响乘客的轨道出行需求,导致轨道交通服务水平下降;A.H.F.CHOW 等<sup>[9]</sup>基于列车运行状态、旅客等待时间及乘客空间感知约束建立了列车成本函数;E.HASSANNAYEBI 等<sup>[10]</sup>以最小化乘客等待时间与车厢空间感知为目标,通过拉格朗日松弛算子来求解;T.ZHANG 等<sup>[11]</sup>在考虑列车容量和路段运行时间条件,在维持较高车厢空间感知的同时优化行程时间,但以上均缺少对运营收益变化的分析。

为体现轨道交通的乘客为本理念,将综合考虑运营收益与车厢空间感知度的影响,从上下行两方向深入挖掘乘客候车时间、客流供需平衡、列车最大载客量、配备车辆数、列车安全运行间隔等约束限制,建立轨道交通发车间隔优化模型。

1 模型建立

1.1 符号表达

为便于阅读,模型中出现的字符表达式统一解释说明如表 1。

表 1 表达式参数符号解释说明  
Table 1 Explanation of expression parameter symbols

表达式符号 模型参数	解释说明
$\Omega$	站点集合 $\Omega=\{1,2,\cdots,i+1,\cdots,s\}$ ,共有 $s$ 个站点
$T$	$T_0$ 为优化起始时刻,此时一辆列车出发, $T_{0+\Delta T}$ 时刻该列车到达终点站
$\Delta T$	一个优化时段长度, min
$C$	列车定员数,人
$M$	轨道配备车辆数,辆
$L$	线路总长度, km
$L_{m,n}$	$m$ 到 $n$ 站点的距离, km ( $1\leq m<n\leq s$ )
$E$	单节车厢实际面积
$g$	列车编组数,辆
$w$	列车停车车厢开门数,个
$a$	一个车厢门每分钟上下车通过人数,人/min
$\Delta t_c$	列车到站开关门时间, min
$q_{m,n}$	$[T_0,T_0+\Delta T]$ 时段内 $m$ 到 $n$ 站点的线路客流量,人 ( $1\leq m<n\leq s$ )
$\eta$	列车满载率, $\bar{\eta}$ 为列车优化时段的平均满载率; $\eta_{\max}$ 为最大满载率

(续表1)

表达式符号 模型参数	解释说明
$r$	优化时段划分区间个数 $r=1, 2, 3, \dots, k=1, 2, \dots, r$
$\mu$	车厢乘客密度, 人/ $\text{m}^2$ ; $\mu_{i,j+1}$ 为一个时段 $i$ 到 $i+1$ 站点的车厢乘客密度; $\mu_{k,i,j+1}$ 为 $k$ 时段 $i$ 到 $i+1$ 站点的车厢乘客密度 ( $1 \leq i \leq s-1, 1 \leq k \leq r$ )
$\Delta t$	列车每次到站停车时间, min; $\Delta t_i^1, \Delta t_i^2$ 分别为上行、下行 $i$ 站点到站停车时间; $\Delta t_{k,i}^1$ 为上行 $k$ 时段 $i$ 站点每次到站停车时间 ( $1 \leq i \leq s-1, 1 \leq k \leq r$ )
$Q_{i,j+1}$	一个优化时段内 $i$ 到 $i+1$ 站点的断面客流量, 人; $Q_{k,i,j+1}$ 为 $k$ 时段内 $i$ 到 $i+1$ 站点断面客流量 ( $1 \leq i \leq s-1, 1 \leq k \leq r$ )
$P_{\text{tot}}$	轨道运营收入, 元; $P_{k,\text{tot}}$ 为 $k$ 时段轨道运营收入 ( $1 \leq k \leq r$ )
$F_{\text{cost}}$	轨道运营总成本, 元; $F_{k,\text{cost}}$ 为 $k$ 时段轨道运营总成本 ( $1 \leq k \leq r$ )
$S_{\text{pop}}$	乘客总车厢空间感知度; $S_{k,\text{pop}}$ 为 $k$ 时段乘客总车厢空间感知度 ( $1 \leq k \leq r$ )
$h$	$h_k$ 为 $k$ 时段内轨道发车间隔, min; $h^*$ 为乘客可接受候车时间。 $h_{k,\text{min}}, h_{k,\text{max}}$ 分别为 $k$ 时段优化发车间隔上限、下限 ( $1 \leq k \leq r$ )

## 1.2 目标函数建立

### 1.2.1 模型假设

根据轨道交通实际情况,研究客流分布与列车运行关系,做出如下模型假设:①考虑客流分布与车辆运行间关系,乘客先到先服务,到站乘客服从均匀分布<sup>[5,9,12,13]</sup>;②列车服务能力正常,列车到站后,乘客先下后上;③线路列车均为同一型号,具有相同的编组;④上下行两方向列车对称运行,且列车各个站点均会停车,不允许超车。

### 1.2.2 运营收益目标

一条线路站点集合为  $\Omega = \{1, 2, \dots, i, i+1, \dots, s\}$ 。根据轨道交通运行特性,  $i$  到  $i+1$  站点间的断面客流量,其出发站点都在  $i$  站点及以前,客流终点站在  $i+1$  站点及以后,则  $i$  到  $i+1$  站点的断面客流量  $Q_{i,j+1}$  为满足上述条件的所有客流量之和。

$$Q_{i,j+1} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=i+1}^s q_{m,n} \quad (1 \leq i \leq s-1) \quad (1)$$

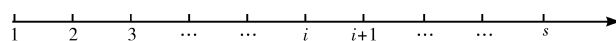


图1 上行方向轨道站点编号  
Fig. 1 Upstream rail station number

如图2,  $T_0$  时刻一辆列车从起点站出发,  $T_{0+c}$  时刻该列车到达终点站,在  $[T_0, T_0+\Delta T]$  时段,所有列车从起始站到终点站,没有列车在途,所有乘客都完成乘车活动。

在优化时段内上行方向,当出行距离为  $L_{m,n}$  时,单位票价为  $f_1(L_{m,n})$  (简化阶梯票价为距离的线形函数)。则一个方向上轨道运营总收入为:

$$P_{\text{tot}} = \sum_{m=1}^{s-1} \sum_{n=2}^s f_1(L_{m,n}) q_{m,n} \quad (1 \leq m < n \leq s) \quad (2)$$

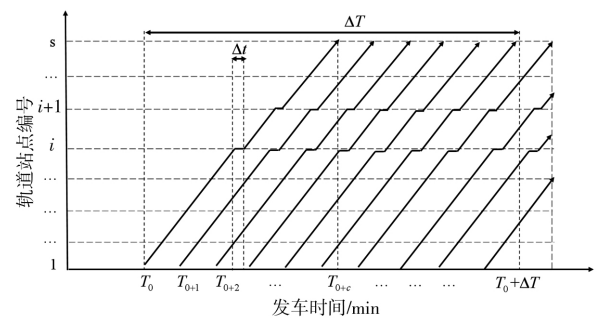


图2 上行方向列车运行时刻

Fig. 2 Upstream train running timetable

在轨道运营中存在上行和下行两个方向。这里约定,站点标号上行由小到大,下行与上行一致,上下行标号相反,列车对称运行。则上下行两个方向运营收入为:

$$P_{\text{tot}} = \sum_{m=1}^{s-1} \sum_{n=2}^s f_1(L_{m,n}) (q_{m,n} + q_{n,m}) \quad (3)$$

运营成本与列车购置、养护、维护费用,人员薪水,能源支出,行驶里程等因素相关,指标繁多复杂。为方便研究计算,认为运营成本<sup>[14]</sup>直接反映的是轨道公司对于运营方面的支出金额,可通过拟合配备车辆数、行驶里程、周转量等指标可对运营成本做出估计。

运营成本与配备车辆数、行驶公里、周转量相关,即  $F_{\text{cost}} = f_2(\text{配备车辆数}, \text{行驶里程}, \text{周转量})$ 。上下行两个方向列车周转量  $\sum_{m=1}^{s-1} \sum_{n=2}^s (q_{m,n} L_{m,n} + q_{n,m} L_{m,n})$ 。在一个优化时段内,列车行驶总里程为  $2L \cdot \Delta T/h$ ,则两个方向运营成本为:

$$F_{\text{cost}} = f_2 \left[ M \frac{2L \cdot \Delta T}{h}, \sum_{m=1}^{s-1} \sum_{n=2}^s (q_{m,n} L_{m,n} + q_{n,m} L_{m,n}) \right] \quad (4)$$

运营公司希望获得最大的效益,即两个方向的轨道收益最大,则目标函数1为:

$$\max Z_1 = P_{\text{tot}} - F_{\text{cost}} \quad (5)$$

### 1.2.3 乘客车厢空间感知目标

研究指出乘客乘坐轨道交通,车厢空间感知度主要由车厢内乘客密度决定<sup>[15]</sup>。车厢乘客数增多,则人均空间占有面积变小,狭隘的空间会导致乘客心理与生理产生不适,较低的车厢空间感知会直接影响乘客对轨道服务的评价以及出行意愿,进而导致轨道交通对乘客的吸引力与服务水平的下降。因此提高乘车体验,提升列车服务水平,必须维持较高的车厢空间感知。而乘客密度与车厢空间感知的关系并非线性的<sup>[16]</sup>,此种关系可通过梯形隶属函数表示,当车厢密度处于较低水平时,乘客空间感知维持较高状态;密度超过一定值,乘客空间感知度随车厢密度提升线性降低。

当车厢乘客密度为 $\mu$ 时,空间感知度为 $f_3(\mu)$ 。上行方向 $i$ 到 $i+1$ 站点,车厢乘客密度 $\mu_{i,i+1} = Q_{i,i+1} \cdot h / (\Delta T \cdot Eg)$ ,上下行总体车厢空间感知度为:

$$S_{\text{pop}} = \sum_{i=1}^{s-1} [f_3(\mu_{i,i+1}) \cdot Q_{i,i+1} + f_3(\mu_{i+1,i}) \cdot Q_{i+1,i}] \quad (6)$$

轨道系统在追求运营效益最大化的同时,维持与社会经济发展相适应的车厢空间体验十分重要,必须从乘客角度出发确定发车间隔。乘客追求舒适宽敞的车厢空间环境,即上下行总体车厢空间感知度最高,故目标函数2为:

$$\max Z_2 = S_{\text{pop}} \quad (7)$$

### 1.3 约束条件

通过对城市轨道交通运营过程分析研究,为保证乘客候车体验、列车安全运行,并满足一系列运营规定,考虑乘客候车时间、客运量供需平衡、列车最大载客量、配备车辆数、运行安全间隔等方面影响建立以下约束。

**约束1:** 乘客在各站点候车时间不宜过长。因假设客流达到呈均匀分布,对于某一时段轨道发车间隔为 $h$ ,则乘客平均候车时间为 $h/2$ 。一个优化时段内,当平均候车时间小于其可接受候车时间 $h^*$ 时,乘客候车体验良好。故约束1为:

$$0 < \frac{h}{2} \leq h^* \quad (8)$$

**约束2:** 发车间隔不能过大,否则乘客滞留人数超过站台服务能力;发车间隔也不能过小,否则会造

成上下车安全隐患。发车间隔应当根据实际客流周转量(供需平衡)确定。发车间隔的计算公式如下:

$$h = \frac{2C \cdot \bar{\eta} \cdot L \cdot \Delta T}{\sum_{m=1}^{s-1} \sum_{n=2}^s (q_{m,n} L_{m,n} + q_{n,m} L_{n,m})} \quad (9)$$

为保证轨道交通有足够的供给能力满足乘客上车需求,拥挤线路的优化发车间隔应当比现有客流量水平计算得到的发车间隔小,将其作为优化发车间隔上限 $h_{\max}$ 。根据其他城市轨道交通运行经验和本市的轨道交通控制技术条件,列车运行安全最小间隔取 $h_{\min}$ 。合理的发车间隔应当介于两者之间。故约束2为:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (10)$$

**约束3:** 任意区段内的列车载客人数不得超过其最大载客量,以此来限定各个区段车厢的乘客密度,使其处于合理范围内。列车在优化时段内从 $i$ 到 $i+1$ 的平均断面乘客数目,不能超过其最大载客量 $C \cdot \eta_{\max}$ ,另一个方向同理。其中最大满载率 $\eta_{\max}$ 根据GB 50157—2013《地铁设计规范》确定。故约束3为:

$$0 < \max_i \left( \frac{Q_{i,i+1}}{\Delta T} h, \frac{Q_{i+1,i}}{\Delta T} h \right) \leq C \cdot \eta_{\max} \quad (11)$$

**约束4:** 轨道运营车辆数应当小于配备车辆数。 $[T_0, T_{0+c}]$ 时段内列车从起点站开到终点站,在该期间内轨道首末站按照既定的发车间隔发车,该时段轨道线路上车辆数近似等于配备车辆数,则上下行运营车辆数为 $2(T_{0+c} - T_0)/h$ 。配备车辆数 $M$ 根据实际客流量数据确定;故约束4为:

$$\frac{2(T_{0+c} - T_0)}{h} \leq M \quad (12)$$

**约束5:** 考虑运行安全,轨道交通不允许后车超过前车,列车每次停车时间必须小于发车间隔。由于研究对象为一个时段的平均断面客流量,停车时间内绝大部分候车乘客都能上车,停车时间等于乘客上下车时间加列车开关门时间。列车优化时段内在 $i$ 站点上行每次停车时间为:

$$\Delta t_i^1 = \frac{1}{wa} \cdot \frac{h}{\Delta T} \left( \sum_{j=i+1}^s q_{i,j} + \sum_{u=1}^{i-1} q_{u,i} \right) + \Delta t_c \quad (13)$$

下行方向停车时间 $\Delta t_i^2$ 同理。故约束5为:

$$\max_i (\Delta t_i^1, \Delta t_i^2) < h \quad (14)$$

上述模型仅对一个长度为 $\Delta T$ 的子时段进行优化,将其推广至整个时段:优化时段平均划分为 $r$  ( $r=1, 2, 3, \dots$ )个区间,每个区间发车间隔为 $h_k$  ( $k=1, 2, \dots, r$ ),其发车间隔分别受到不同时间的客流量水



平约束。最终优化模型如式(15)~式(16)。

$$\max Z_1 = \sum_{k=1}^r P_{k, \text{tot}} - F_{k, \text{cost}}, \max Z_2 = \sum_{k=1}^r S_{k, \text{pop}} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 < \frac{h_k}{2} \leq h^* \\ h_{k, \min} \leq h_k \leq h_{k, \max} \\ 0 < \max\left(\frac{Q_{k, [i+1]}}{\Delta T} h_k, \frac{Q_{k, [i+1-i]}}{\Delta T} h_k\right) \leq C \cdot \eta_{\max} \\ \frac{2(T_{0+c} - T_0)}{h_k} \leq M \\ \max(\Delta t_{k,i}^1, \Delta t_{k,i}^2) < h_k \\ k=1, 2, \dots, r; i=1, 2, \dots, s-1 \end{cases} \quad (16)$$

此为多目标规划,直接求解困难,通常将其转化为单目标优化问题,为使得优化目标能够均衡考虑两目标影响,做到“兼顾效益,乘客为本”,在保证轨道运营收益较高的同时,提高车厢空间环境,带来舒适的乘车体验,因此考虑运营收益和车厢空间感知具有相同权重,构造目标函数如下,其中 $Z_j^*$  ( $j=1, 2$ )为运营收益与车厢空间感知度目标各自在约束条件下的最优值(此处除以 $Z_j^*$ 是为了消除量纲)。目标函数越大,则运营收益和车厢空间感知度越接近最优,此时模型解能够充分考虑两目标的影响。

$$F(Z) = - \sum_{j=1}^2 \left( \frac{Z_j - Z_j^*}{Z_j^*} \right)^2 \quad (17)$$

## 2 算法步骤

相较于传统的优化方法,启发式算法更适合描述复杂的多变量非线性优化问题,常用的有模拟退火、粒子群、遗传算法等。本文采用遗传算法对轨道发车间隔优化问题进行求解,相较于模拟退火和粒子群算法<sup>[17]</sup>,遗传算法对初始解依赖性较小,不易陷入局部最小值,在高效快速的搜索全局可行解上更具有优势;同时遗传算法可以进行并行迭代,极大的减少了后期时间成本;成熟的收敛估计也让优化结果分析更为完善<sup>[18]</sup>,其基本步骤<sup>[18]</sup>如下:

### 2.1 可行解生成

对发车间隔的可行解进行编码生成。一个可行解称为染色体,组成染色体的元素称为基因。遗传算法中染色体生成、交叉、变异等操作所产生解的基因必须在约束(16)限制范围内。

### 2.2 适应度函数与个体选择

目标函数 $F(Z)$ 即为适应度函数,通过适应度函数评价各个可行解染色体的适应度,适应度越高,该染色体被选择遗传至下一代的概率越高。

### 2.3 染色体交叉突变

将被选择一对染色体按照固定位置交叉产生新的染色体;同时根据突变概率染色体的某些基因值会随机进行改变。遗传算法将重复此过程:产生新的发车间隔染色体,每个染色体被适应度函数评价,通过选择交叉,然后随机突变,产生下一代,直到终止条件满足为止。

## 3 实例验证

### 3.1 实例计算

以武汉轨道交通4号线为例,选取的客流数据必须具有代表性,能够反映本线路日常的客流出行需求,对2019年2月1~28日内工作日(周一至周五,运营时段6:30~22:30)客流量数据进行按照天数平均处理后作为研究数据。

线路总长度为33.4 km,车型为B型车,编组数为6,单节车厢额定载客量为240人,最大满载率 $\eta_{\max}=1.4$ ,列车停车车厢开门数 $\max Z = 1\ 204\ 073 -$

$$140\ 388.68 \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} \right) - \max \left( 0, \sum_{k=1}^3 \lambda_k \right) \alpha = 24, \text{列}$$

车站点开门关门时间取 $\Delta t = 10\text{ s}$ ,配备车辆数 $M = 36$ ,最小发车间隔为2 min/辆,一趟车从起点开至终点的时间为52 min。4号线全天断面客流量如图3,其中高峰时段出行需求矛盾较为突出,以该时段为研究对象更能反映现实问题,由图可知目前高峰小时段为7:00—8:00、8:00—9:00、9:00—10:00,其发车间隔分别为3.85、3.85和4.45 min。根据武汉现行轨道交通定价规则,行驶里程 $L_{m,n}$ 与票价 $f_1(L_{m,n})$ 服从以下线性关系:

$$f_1(L_{m,n}) = 0.211L_{m,n} + 1.721\ 7, R^2 = 0.991\ 5 \quad (18)$$

通过多元回归拟合武汉市轨道交通4号线的历史运营数据,其运营总成本 $F_{\text{cost}}$ 与配备车辆数(辆)、行驶里程(km)和列车周转量(人·km)关系如下:

$$F_{\text{cost}} = 4.480 \times 10^3 \times \text{配备车辆数} + 35.025 \times \text{行驶里程} + 0.368 \times \text{列车周转量} \quad (19)$$

$F$ 值、 $p$ 值均通过检验,模型参数检验结果如表2,运营总成本与配备车辆数、行驶里程、列车周转量存在显著性关系。

表 2 模型各参数检验结果

Table 2 Test results of various parameters of the model

参数	检验结果		
	估计参数	t 值	显著性
配备车辆/辆	$4.480 \times 10^3$	2.342	*
运营里程/km	35.025	8.735	**
周转量/(人·km)	0.368	3.805	**

显著性说明: \* 一般, \*\* 显著, \*\*\* 非常显著

参考相关文献研究<sup>[16]</sup>, 车厢密度与乘客车厢空间感知度的关系近似如图 4:

$$f_3(\mu) = \begin{cases} 1, & 0 < \mu < 1 \\ -0.14286\mu + 1.1429, & 1 \leq \mu \leq 8 \end{cases}, R^2 = 0.9 \quad (20)$$

取优化时段为 7:00—10:00 平均划分为 3 个子时段, 每个时段长度  $\Delta T = 60 \text{ min}$ , 其发车间隔分别为  $h_1, h_2, h_3$ 。将式(18)~式(20)函数关系结合各个时段的客流数据, 带入适应度函数, 其各个时段约束为:

$$\begin{aligned} &0 \leq h_1 \leq 8, 0 \leq h_2 \leq 8, 0 \leq h_3 \leq 8 \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 2 \leq h_1 \leq 3.85, 2 \leq h_2 \leq 3.25, 2 \leq h_3 \leq 4.07 \\ 0 \leq h_1 \leq 16.59, 0 \leq h_2 \leq 6.23, 2 \leq h_3 \leq 14.9 \\ 2.89 \leq h_1, h_2, h_3 \\ 1.4 \leq h_1, 2.15 \leq h_2, 1.6 \leq h_3 \end{cases} \quad (21) \end{aligned}$$

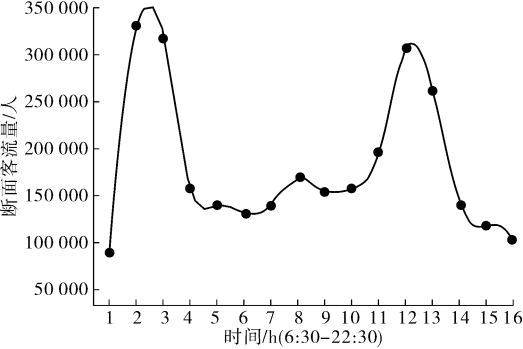


图 3 4 号线全天断面客流量

Fig. 3 Passenger flow for all-day section of Line 4

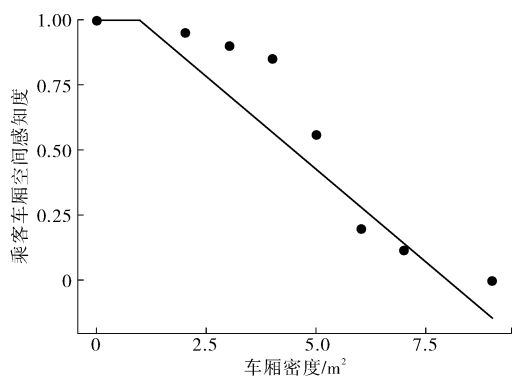


图 4 车厢密度与乘客车厢空间感知度关系

Fig. 4 Relationship between cabin density and passenger space perception

3.2 结果与分析

遗传算法可行解数量设定为 200; 突变概率设定为 0.01。优化结果如图 5, 迭代 1 000 次以后, 评估函数值最大、平均、中位值均趋于稳定, 最终优化结果为  $h_1 = 3.75 \text{ min}$ ,  $h_2 = 2.89 \text{ min}$ ,  $h_3 = 3.57 \text{ min}$ 。

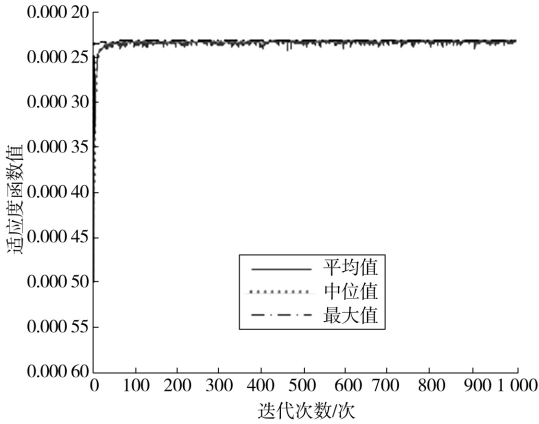


图 5 迭代次数与适应度函数

Fig. 5 Iteration times and fitness function

优化前后方案比较, 各个时段指标对比如图 6: 7:00—8:00 时段, 车厢拥挤程度一般, 优化后的乘客车厢空间感知度变化幅度小于轨道收益下降幅度; 8:00—9:00 时段, 客流密度最高车厢最为拥挤, 加大发车班次在略微减少轨道收益的情况下, 能够极大的提升车厢空间感知; 9:00—10:00 时段客流密度下降, 乘客车厢空间感知度与轨道收益两个指标变化幅度处于平衡状态。整个高峰时段总体收益下降 1.9%; 而乘客车厢空间感知度提升了 3.3%。该优化结果考虑运营收益与车厢空间感知度的相互影响, 在运营收益小幅度下降的前提下有效提升乘客车厢空间感知度, 保证列车安全运行并缓解 4 号线早高峰的拥挤情况。

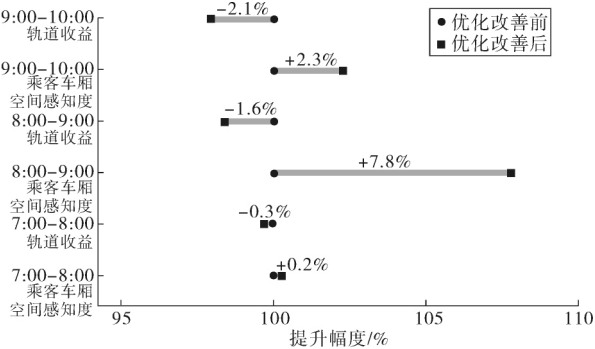


图 6 优化前后乘客车厢空间感知度和轨道收益提升幅度比较

Fig. 6 Comparison of passenger compartment space perception and rail revenue before and after optimization

轨道交通高峰时段, 客流量变化具有随机不确

定性。将客流量在原有的基础上提升相应的幅度,按最终优化结果计划发车,对其进行客流的敏感性分析。对比目前现状水平,轨道运营收益和乘客车厢空间感知度变化幅度如图7。由图可知当客流量提升10%,相较于目前的水平,轨道收益略微降低1.69%,运营收益损失较少;而乘客车厢空间感知度高出原有水平1.93%,乘客车厢体验较好。

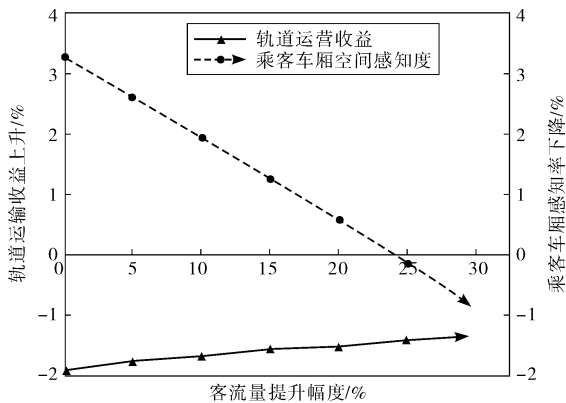


图7 轨道收益与乘客车厢空间感知度随客流量提升变化

Fig. 7 Variation of rail revenue and passenger compartment space perception changing with the increase of passenger flow

通过对以上两指标变化规律研究发现,优化方案下乘客空间感知变化大于轨道收益变化幅度,在客流量提升的情况下按照计划方案发车,轨道运营公司仍可在损失较少运营收益的前提下,维持较高的乘客车厢空间感知度,给予乘客舒适的车厢环境,可在轨道发车间隔制定中作为不确定客流情况下的方案参考。由于模型本身是以断面客流量为基础进行构建的,具有普适性,对于其他时段(如工作日或者节假日)在给定的客流的前提下均能得出详细的优化方案。

## 4 结 论

模型在考虑运营收益与车厢空间感知度影响下进行发车间隔优化,通过实例分析和方案对比验证,可得出以下结论:

1) 模型优化方案相较于原方案在合理运营收益范围的前提下,能够有效提升乘客车厢空间感知并缓解车厢拥挤情况,体现了轨道交通服务的准公共性与乘客为本的理念。

2) 模型在客流增长一定范围内,能够适应复杂客流的变化情况,验证了客流量提升情况下模型的可行性,可为轨道公司运营决策提供参考。

同时以后研究将进一步从交通流的随机性,各

站客流的差异性出发,考虑短小时内大客流站点的客流交互情况,进行轨道交通调度优化,建立更为完善的模型。

## 参考文献 (References):

- [1] BÖRJESSON M, RUBENSSON I. Satisfaction with crowding and other attributes in public transport [J]. *Transport Policy* 2019, 79( 6): 213–222.
- [2] 李昌涛. 城市轨道交通行业发展现状与趋势[J]. *交通世界* 2019( 19): 8–9.  
LI Changtao. Development status and trend of urban rail transit industry [J]. *Traffic World* 2019( 19): 8–9.
- [3] 邹松. 城市轨道交通票价政策研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.  
ZOU Song. *Urban Rail Transit Fare Policy Research* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [4] 宋瑞, 邵彦雯, 李婷婷. 城市轨道交通线路运营计划优化方法[J]. *北京交通大学学报* 2015, 39( 6): 32–38.  
SONG Rui, ZOU Yanwen, LI Tingting. Optimization method of operation planning for urban rail transit line [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University* 2015, 39( 6): 32–38.
- [5] 刘东晓, 姜志侠, 周圣杰. 城市轨道交通发车间隔的优化方法研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40( 4): 115–119.  
LIU Dongxiao, JIANG Zhixia, ZHOU Shengjie. Study on optimization method of departure interval of urban rail transit train [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)* 2017, 40( 4): 115–119.
- [6] BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S, CHU C. Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 115( 6): 227–245.
- [7] GUO X, SUN H, WU J, et al. Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 96( 2): 46–67.
- [8] TIRACHINI A, HURTUBIA R, DEKKER T, et al. Estimation of crowding discomfort in public transport: Results from Santiago de Chile [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2017, 103( 9): 311–326.
- [9] CHOW A H F, PAVLIDES A. Cost functions and multi-objective timetabling of mixed train services [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2018, 113( 6): 335–356.
- [10] HASSANNAYEBI E, ZEGORDI S H, YAGHINI M. Train timetabling for an urban rail transit line using a Lagrangian relaxation approach [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40( 23–24): 9892–9913.
- [11] ZHANG T, LI D, QIAO Y. Comprehensive optimization of urban rail transit timetable by minimizing total travel times under time-dependent passenger demand and congested conditions [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 58( 6): 421–446.

(下转第61页)

- [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(2): 519-526.
- LYU Xuewei, YANG Bin, YUAN Jianfei. Optimal path selection of multimodal transport under the perspective of low carbon [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(2): 519-526.
- [8] 侯宇超, 白艳萍, 胡红萍, 等. 基于精英蚁群算法的多目标生鲜配送路径优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(20): 50-57.
- HOU Yuchao, BAI Yanping, HU Hongping, et al. Study of multi-objective fresh food distribution route optimization based on elite ant colony algorithm [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(20): 50-57.
- [9] DULEBENETS M A, OZGUVEN E E, MOSES R, et al. Intermodal freight network design for transport of perishable products [J]. *Open Journal of Optimization*, 2016, 5(4): 120-139.
- [10] 李玉民, 郭晓燕, 杨露. 考虑多目标的中欧集装箱多式联运路径选择[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2239-2248.
- LI Yumin, GUO Xiaoyan, YANG Lu. Route optimization of China-EU container multimodal transport considering various factors [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2239-2248.
- [11] 万杰, 魏爽. 基于混合算法的多目标多式联运路径选择问题研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(3): 285-292.
- WAN Jie, WEI Shuang. Multi-objective multimodal transportation path selection based on hybrid algorithm [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(3): 285-292.
- [12] MA Zujun, WU Yao, DAI Ying. A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time widows for perishable product delivery [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017(114): 101-113.
- [13] 范厚明, 杨翔, 李荡, 等. 基于生鲜品多中心联合配送的半开放式车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 256-266.
- FAN Houming, YANG Xiang, LI Dang, et al. Half-open multi-depot vehicle routing problem based on joint distribution mode of fresh food [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 256-266.
- [14] 李宇慧, 郑国华, 曹靖. 基于遗传算法的蓄冷式冷品多温共配成本优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 879-884.
- LI Yuhui, ZHENG Guohua, CAO Jing. Optimization of multi-temperature joint distribution of storage-type cold-chain mode based on genetic algorithm [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(4): 879-884.
- (责任编辑: 刘 韬)
- 
- (上接第47页)
- [12] SHI F, ZHAO S, ZHOU Z, et al. Optimizing train operational plan in an urban rail corridor based on the maximum headway function [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 74(1): 51-80.
- [13] INGVARSDON J B, NIELSEN O A, RAVEAU S, et al. Passenger arrival and waiting time distributions dependent on train service frequency and station characteristics: A smart card data analysis [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 90(5): 292-306.
- [14] MO P, YANG L, WANG Y, et al. A flexible metro train scheduling approach to minimize energy cost and passenger waiting time [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 132(6): 412-432.
- [15] MOHD MAHUDIN N D, COX T, GRIFFITHS A. Measuring rail passenger crowding: Scale development and psychometric properties [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2012, 15(1): 38-51.
- [16] 吴奇兵, 陈峰, 刘畅. 基于舒适性的轨道交通车厢合理立席密度研究[J]. 综合运输, 2014(4): 53-58.
- WU Qibin, CHEN Feng, LIU Chang. Research on reasonable stand density of rail transit cars based on comfort [J]. *Integrated Transportation*, 2014(4): 53-58.
- [17] 王雪梅. 城市轨道交通列车发车间隔优化研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(4): 273-275.
- WANG Xuemei. Research on optimization of train intervals in urban rail transit trains [J]. *Highway Traffic Technology (Application Technology Edition)*, 2015, 11(4): 273-275.
- [18] MULLOORAKAM A T, MATHEW NIDHIRY N. Combined objective optimization for vehicle routing using genetic algorithm [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 11(7): 891-902.
- [19] YANG X, CHEN A, NING B, et al. Bi-objective programming approach for solving the metro timetable optimization problem with dwell time uncertainty [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 97(1): 22-37.
- (责任编辑: 朱汉容)