【交通物流 / Transportation Logistics】

绿色导向下供需协同的城轨列车开行方案优化

杨雯雯[1,2]，孟学雷[1]，高如虎[1]，付艳欣[1]，林立[3]

1）兰州交通大学交通运输学院，甘肃兰州730070；2）兰州石化职业技术大学国际商务学院，甘肃兰州 730070；3）兰州交通大学机械工程博士后流动站，甘肃兰州730070

摘　要：针对开行方案不合理导致的运能未完全发挥、客流需求满足度低及企业运营成本偏高等问题，提出一种基于交通资源优化配置原则的供需协同城轨列车开行方案．基于乘客实际换乘行为引入乘客出行偏好，建立以列车供需协同性最高、各类乘客出行总成本及企业运营总成本最低为优化目标，以碳排放、列车开行频率及线路通过能力等为约束的多目标优化模型．设计自适应退火-鲸鱼算法求解模型，并通过算例验证其有效性．结果表明，相较于单一交路多编组、大小交路短编组及大小交路长编组模型，大小交路多编组模型在优化碳排放的同时，列车供需协同性分别提升了185.92、53.15及36.07，乘客出行总成本分别减少了17.8%、11.45%及8.34%，企业运营总成本分别减少29.09%、5.67%及4.97%；相较于鲸鱼优化算法和模拟退火算法，自适应退火-鲸鱼算法的适应度值分别优化了7.55%和5.65%，收敛速度分别提升了4.46%和7.55%，且所有目标均得到优化．本模型能够兼顾乘客、企业成本及碳排放，提升了供需协同性，所设计算法具有较高性能，满足模型需求．

关键词：交通运输规划与管理；城轨列车；列车开行方案；供需协同；碳排放；自适应退火-鲸鱼算法

中图分类号：U231.92；TP301.6　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3724/SP.J.1249.2026.01036

Optimization of urban rail train operation plans with supply-demand coordination under green orientation

YANG Wenwen[1,2], MENG Xuelei[1], GAO Ruhu[1], FU Yanxin[1], and LIN Li[3]

1) School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

2) School of International Business, Lanzhou Petrochemical University of Vocational Technology, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

3) Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: To address the issues of underutilized transport capacity, low passenger demand satisfaction, and high enterprise operating costs caused by unreasonable train operation plans, this study proposes a supply-demand coordinated train operation plan for urban rail transit based on the principle of traffic resource optimization allocation. Incorporating passenger travel behaviors and travel preferences, a multi-objective optimization model is established. The objectives are to maximize train supply-demand coordination, minimize the total passenger travel costs, and minimize the total enterprise operating costs. The model is subject to constraints such as carbon emissions, train departure frequency and line throughput capacity. An adaptive annealing-whale optimization

Received: 2025-02-20; **Accepted:** 2025-06-05; **Online** (CNKI)**:** 2025-09-22

Foundation: Science and Technology Program of Gansu Province (24JRRA865, 25JRRA220); National Natural Science Foundation of China (72361020); Central Guidance for Local Science and Technology Development Foundation (25ZYJA015)

Corresponding author: Professor MENG Xuelei (mxl@mail.lzjtu.cn)

Citation: YANG Wenwen, MENG Xuelei, GAO Ruhu, et al. Optimization of urban rail train operation plans with supply-demand coordination under green orientation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(1): 36-46. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

http://journal.szu.edu.cn

algorithm is designed to solve the model, and its effectiveness is verified through a case study. The results show that, compared to the full-length route with multi-type formation, short-turn route with short formation, and short-turn route with long formation models, the short-turn route with multi-type formation model not only optimizes carbon emissions but also improves train supply-demand coordination by 185. 92, 53. 15 and 36. 07, respectively. It also reduces the total passenger travel costs by 17. 8%, 11. 45% and 8. 34%, and decreases the total enterprise operating costs by 29. 09%, 5. 67% and 4. 97%, respectively. Furthermore, compared with the whale optimization algorithm and simulated annealing algorithm, the proposed adaptive annealing-whale optimization algorithm improves the fitness value by 7. 55% and 5. 65%, and convergence speed by 4. 46% and 7. 55%, respectively, while optimizing all objectives. Therefore, the proposed model effectively enhances passengers, enterprise costs as well as carbon emissions, enhances supply-demand coordination. The designed algorithm demonstrates high solution performance in satisfying the model′s requirements.

Key words: transportation planning and management; urban rail trains; train operation plan; supply-demand coordination; carbon emissions; adaptive annealing - whale optimization algorithm

随着城市化进程加速，客流需求持续增长，客流时空分布不均衡性日趋显著，绿色发展理念为解决轨道交通供需矛盾提供了关键路径．绿色导向的城轨发展模式不仅关注环境影响，还通过优化资源配置推动可持续发展．列车开行方案是铁路运输组织的核心[1]，大小交路多编组策略能有效缓解高峰时段客流多点集中与座位多点冗余之间的矛盾．因此，研究基于低碳约束并考虑供需协同的城轨大小交路多编组列车开行方案，对提升资源利用、优化运输组织及推动绿色发展具有重要意义．

基于绿色低碳理念，学者们从不同角度开展了列车开行方案研究．戴延泽等[2]提出一种考虑碳排放量的城轨列车开行方案．林立等[3]从企业、乘客及政府3方角度出发，构建城轨列车开行方案模型．冉昕晨等[4]针对潮汐客流，设计融合大小交路与列车非满载运行策略的优化模型．杨雯雯等[5]提出一种兼顾运输效率与碳排放的城轨列车开行方案模型．基于交路方案优化，姚恩建等[6-7]强调了大小交路在成本平衡与资源配置中的作用．ZHANG等[8]则关注减少乘客平均等待时间并提升线路运力利用率．林立等[9]强调交路方案优化在应对突发事件中的重要性．基于编组方案优化，MO等[10]提出在线路上灵活调配不同编组类型的列车，以实现运力的精确配置．李正洋等[11]建立考虑多交路和多编组模式的城轨列车交路计划优化模型，显著降低了乘客候车时间的同时，有效减少了列车的平均满载率．DELLE等[12-13]探讨不同场景下的多编组优化问题，表明通过灵活调整车辆规模和运行方式，可有效提升运力利用率和服务效率．针对列车开行方案的求解，目前多采用传统的启发式算法，如遗传算法[14]和模拟退火算法[15]等．

关于绿色导向下供需协同的城轨列车开行方案的研究相对较少，已有研究多以硬性约束[2]确保运力大于各区间最大断面客流量，但在高峰时段，运力可能不足以完全满足需求，从而导致模型无解；在模型构建层面，现有文献从客流分配[5]、列车开行频率[6]和交路模式[9]等方面进行研究，除了关注乘客出行时间成本[2-6]和企业运营成本[2-6]外，大多仅侧重于资源利用或碳排放的单一目标[2-4]，综合考虑二者的研究甚少，且针对多交路多编组策略的综合研究也相对较少；在模型求解方法上，融合各算法优势的优化策略亦较少．基于此，本研究在碳排放约束下，综合考虑资源、乘客及企业效益，构建基于乘客出行偏好的供需协同大小交路多编组城轨列车开行方案，设计一种综合鲸鱼优化算法和模拟退火算法优势的自适应退火-鲸鱼算法进行求解．在实现交通资源优化配置的同时，提高了乘客满意度和企业竞争力．

1　问题描述

1.1　大小交路概述

图1为1条拥有n座车站的城市轨道交通线路图，将车站集合定义为$S=\{S_x|x=1,2,\cdots,n\}$，其中，S_1和S_n为大交路的起讫(origin destination，OD)站；S_a和S_b为小交路的OD站，a和b表示小交路位置编号．大交路区段Ⅰ包括S_1—S_a和S_b—S_n两个区段，只开行大交路列车；小交路区段Ⅱ为S_a—S_b区段，能同时开行大小交路列车．为更好地适应客流分布的时空不均衡性特征，增强客流和运

http://journal.szu.edu.cn

能之间的匹配度，本研究采用多编组模式，将列车编组模式集合定义为$M=\{m|m_1,m_2\}$，其中，m_1和m_2分别表示短编组列车和长编组列车的编组；在上行方向，f_1和f_2分别表示大交路和小交路列车的开行频率，单位：对/h；大(小)交路列车分为大(小)交路短编组列车和大(小)交路长编组列车，其开行频率分别为$f_1^{m_1}\left(f_2^{m_1}\right)$和$f_1^{m_2}\left(f_2^{m_2}\right)$，单位:对/h.

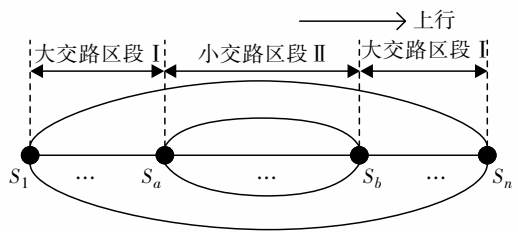

图1 城市轨道交通线路

Fig. 1 Urban rail transit route schematic.

1.2 客流分析

在上行方向，基于OD点不同对客流进行分类，见图2. 为确保行程的高效与便捷，依据乘客非必要不换乘的原则，出发地在区段Ⅰ的客流①、②、③及⑥路列车直达；出发地和目的地均在区段Ⅱ的客流④可选择乘坐大交路列车或乘坐小交路列车直达；出发地和目的地分别在区段Ⅰ和Ⅱ的客流⑤有两种出行选择：乘坐大交路列车直达或乘坐小交路列车换乘大交路列车到达，前者候车时间较长，后者增加了换乘时间，此时需要考虑乘客出行偏好.

2 开行方案模型

2.1 模型假设

本模型做如下假设：① 列车采用站站停模式，各站均具备折返条件，折返时间相同，不考虑越行作业；② 乘客以均匀分布的方式到达车站，遵循先到先服务原则；③ 相关基础设施设备可满足多编组的运营需求；④ 乘客最多换乘1次；⑤ 大小交路列车独立运行，采用固定车底方式，车底独立周转.

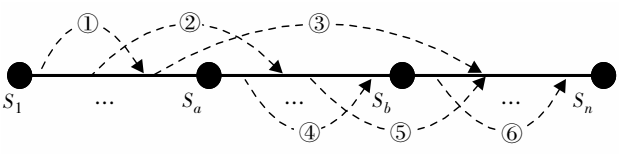

图2 上行方向客流分类

Fig. 2 Upbound passenger-flow classification diagram.

2.2 目标函数

1）目标函数1：供需协同性高

城市轨道交通供需协同性是衡量资源配置合理性的关键指标. 供需协同性越高，表明资源供给与客流需求的匹配度越好，从而提升资源利用效率并减少冗余浪费，这与绿色发展理念中优化交通资源配置的目标高度契合. 本研究引入供需偏离度Z_1作为供需协同性的度量指标，用以表征线网运能供给与客流需求之间的偏离程度. 该指标通过量化研究时段内各区间的运输能力(运能供给量)与各区间断面客流量(客流需求量)之间的差异，并结合各区间距离与线路总距离的加权平均数进行计算. Z_1越小，表示运能供给与客流需求之间的偏离程度越低，对应的供需协同性越高；反之，二者匹配程度较低，供需协同效果较差. 本研究以最小化Z_1为目标，通过优化运能供给与客流需求之间的偏差，提升供需协同性，确保城市轨道交通系统资源配置的最优效益. 最小化Z_1可表示为

$$\min Z_1=\frac{1}{L_{\text{total}}(n-1)}\left\{\sum_{k=1}^{a-1}\left|T_{\text{h}}\left(f_1^{m_1}C_{m_1}+f_1^{m_2}C_{m_2}\right)-Q_{k,k+1}\right|L_{k,k+1}+\sum_{k=a}^{b-1}\left|T_{\text{h}}\left[\left(f_1^{m_1}+f_2^{m_1}\right)C_{m_1}+\left(f_1^{m_2}+f_2^{m_2}\right)C_{m_2}\right]-\right.$$
$$\left.Q_{k,k+1}\right|L_{k,k+1}+\sum_{k=b}^{n-1}\left|T_{\text{h}}\left(f_1^{m_1}C_{m_1}+f_1^{m_2}C_{m_2}\right)-Q_{k,k+1}\right|L_{k,k+1}\Bigg\}\tag{1}$$

其中，$L_{k,k+1}$为车站S_k到S_{k+1}之间的距离，单位：km；L_{total}为线路总长，单位：km；T_{h}为研究时段，单位：h；C_{m_1}和C_{m_2}分别为短编组列车和长编组列车的定员，单位：人/列；$Q_{k,k+1}$为车站S_k到S_{k+1}的断面客流量，单位：人，

$$Q_{k,k+1}=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=k+1}^{n}q_{ij}\tag{2}$$

其中，q_{ij}为从车站S_i出发到S_j下车的客流量，单位：人.

2）目标函数2：各类乘客出行总成本最低

乘客的出行成本包含购票成本和出行时间成本[5]. 其中，出行时间成本包括候车时间成本、因停站引起的在车等待时间成本、列车纯运行时间成本及换乘时间成本. 由于城轨OD点固定，因此，

http://journal.szu.edu.cn

本研究仅考虑各类乘客的候车时间成本、停站等待时间成本和换乘时间成本.

首先，测算各类乘客的候车时间成本和换乘时间成本. 对均匀到达车站的乘客而言，候车等待时间近似为发车间隔时长的一半[2]. 由于①、②、③及⑥类客流仅需乘坐大交路列车即可到达目的地，因此，这4类客流的总候车等待时间T_1为

$$T_1=\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}\right)}\left(\sum_{i=1}^{a-1}\sum_{j=i+1}^{n}q_{ij}+\sum_{i=b}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}q_{ij}\right) \tag{3}$$

④类客流乘坐大小交路列车均可直达目的地，其候车等待时间T_4为

$$T_4=\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}+f_2^{m_1}+f_2^{m_2}\right)}\sum_{i=a}^{b-1}\sum_{j=i+1}^{b}q_{ij} \tag{4}$$

依据下一趟到达列车是否为大交路列车，可将⑤类客流分成两部分，见图3. 其中，I_1和分别I_2为大小交路列车发车间隔. 第1部分为区域C内到达的客流，下一趟到达列车为大交路列车，依照非必要不换乘原则，这部分客流直接乘坐大交路列车即可到达目的地；第2部分为区域A和B内到达的客流，下一趟列车为小交路列车，乘客有两种出行选择：等待大交路列车直达目的地或乘坐小交路列车并换乘大交路列车到达目的地，前者候车时间较长，后者增加了换乘时间，此时，考虑乘客出行偏好，$\beta(0\leqslant\beta\leqslant1)$表示乘客选择大交路直达目的地的概率，取$\beta=0.6$[16].

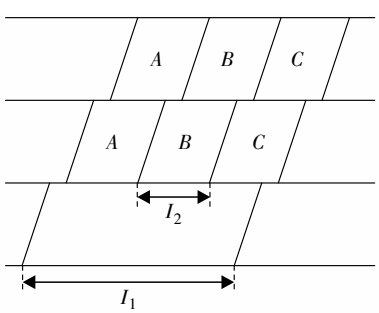

图3　大小交路列车运行图

Fig. 3　Full-length and short-turn train operation diagram.

大小交路列车的发车频率关系为$f_2=xf_1,(x>0)$，此时，$I_1=(x+1)I_2$. 因此，区域C内到达客流的总候车时间$T_{5,C}$为

$$T_{5,C}=\frac{1}{x+1}\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}+f_2^{m_1}+f_2^{m_2}\right)}\sum_{i=a}^{b-1}\sum_{i=b+1}^{n}q_{ij} \tag{5}$$

在区域A和B内到达的客流中，选择乘坐大交路列车直达的客流总候车时间$T_{5,AB直}$为

$$T_{5,AB直}=\frac{x}{x+1}\beta\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}\right)}\sum_{i=a}^{b-1}\sum_{i=b+1}^{n}q_{ij} \tag{6}$$

在区域A、B内到达的客流中，选择乘坐小交路列车并换乘大交路列车的乘客候车时间和换乘时间的总和$T_{5,\ AB换}$为

$$T_{5,AB换}=\frac{x}{x+1}(1-\beta)\left[\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}\right)}+\frac{T_{\mathrm{h}}}{2\left(f_1^{m_1}+f_1^{m_2}+f_2^{m_1}+f_2^{m_2}\right)}+\frac{T_{\mathrm{trans}}}{60}\right]\sum_{i=a}^{b-1}\sum_{i=b+1}^{n}q_{ij} \tag{7}$$

其中，T_{trans}为单个乘客换乘1次所需的时间，单位：min.

以下测算停站等待时间成本. 上下车客流量的大小直接影响列车的停站时长[6]，客流量较大的车站停站时间相对较长，停站时列车仅开启单侧车门. 由于列车有长、短两种编组，故根据列车不同编组的车辆数分摊中间站的上下车客流，假设乘坐短编组列车的客流分摊率为∂，则乘坐长编组列车的客流分摊率为$1-\partial$，

$$\partial=\begin{cases}\dfrac{m_1f_1^{m_1}}{m_1f_1^{m_1}+m_2f_1^{m_2}}, & \text{区段Ⅰ}\\[2ex] \dfrac{m_1\left(f_1^{m_1}+f_2^{m_1}\right)}{m_1\left(f_1^{m_1}+f_2^{m_1}\right)+m_2\left(f_1^{m_2}+f_2^{m_2}\right)}, & \text{区段Ⅱ}\end{cases} \tag{8}$$

区段Ⅰ和Ⅱ中任意站的停站时长$T_k^{\mathrm{Ⅰ}}$和$T_k^{\mathrm{Ⅱ}}$(单位：h)为

$$T_k^{\mathrm{Ⅰ}}=\frac{1}{3\,600}\left[\partial\frac{\left(q_{k上}+q_{k下}\right)t_k}{f_1^{m_1}m_1\mu}+(1-\partial)\frac{\left(q_{k上}+q_{k下}\right)t_k}{f_1^{m_2}m_2\mu}+t_{\mathrm{extra}}\right] \tag{9}$$

$$T_k^{\mathrm{Ⅱ}}=\frac{1}{3\,600}\left[\partial\frac{\left(q_{k上}+q_{k下}\right)t_k}{\left(f_1^{m_1}+f_2^{m_1}\right)m_1\mu}+(1-\partial)\frac{\left(q_{k上}+q_{k下}\right)t_k}{\left(f_1^{m_2}+f_2^{m_2}\right)m_2\mu}+t_{\mathrm{extra}}\right] \tag{10}$$

其中，k为中间站代号；$q_{k上}$和$q_{k下}$分别为中间站S_k上车和下车的乘客数量，单位：人；t_k为单个乘客在中间站S_k上下车花费的时间，单位：s；μ为列车每节车厢的车门对数；t_{extra}为平均车门开启和关闭时长总和，单位：s.

因此，①—⑥类客流的停站等待时间T_{s}^1—T_{s}^6分别为

http://journal.szu.edu.cn

$$T_s^1 = \sum_{i=1}^{a-1}\sum_{j=i+1}^{a} q_{ij}\sum_{k=i+1}^{j-1} T_k^{\mathrm{I}} \tag{11}$$

$$T_s^2 = \sum_{i=1}^{a-1}\sum_{j=a+1}^{b} q_{ij}\left(\sum_{k=i+1}^{a-1} T_k^{\mathrm{I}} + \sum_{k=a}^{j-1} T_k^{\mathrm{II}}\right) \tag{12}$$

$$T_s^3 = \sum_{i=1}^{a-1}\sum_{j=b+1}^{n} q_{ij}\left(\sum_{k=i+1}^{a-1} T_k^{\mathrm{I}} + \sum_{k=a}^{b} T_k^{\mathrm{II}} + \sum_{k=b+1}^{j-1} T_k^{\mathrm{I}}\right) \tag{13}$$

$$T_s^4 = \sum_{i=a}^{b-1}\sum_{j=i+1}^{b} q_{ij}\sum_{k=i+1}^{j-1} T_k^{\mathrm{II}} \tag{14}$$

$$T_s^5 = \sum_{i=a}^{b-1}\sum_{j=b+1}^{n} q_{ij}\left(\sum_{k=i+1}^{b} T_k^{\mathrm{II}} + \sum_{k=b+1}^{j-1} T_k^{\mathrm{I}}\right) \tag{15}$$

$$T_s^6 = \sum_{i=b}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} q_{ij}\sum_{k=i+1}^{j-1} T_k^{\mathrm{I}} \tag{16}$$

因此，总停站时间 $T_s = T_s^1 + T_s^2 + T_s^3 + T_s^4 + T_s^5 + T_s^6$. 最小化各类乘客的出行总成本 Z_2 可表示为

$$\min Z_2 = C_1(T_1 + T_4 + T_{5,C} + T_{5,AB直} + T_{5,AB换} + T_s) \tag{17}$$

其中，C_1 为非工作时间的时间价值，单位：元/h.

3）目标函数3：企业运营总成本最少

企业运营总成本包括变动成本和固定成本. 变动成本 C_v 用车辆公里费用与车辆数及运营里程的乘积表示. 车辆公里费为车辆每运行1 km所分摊的运输支出，包括设备设施维修保养费、车辆整备费、司乘人员工资和折旧费等，即

$$C_v = C_2 T_h\left[L_{total}(f_1^{m_1}m_1 + f_1^{m_2}m_2) + L_{ab}(f_2^{m_1}m_1 + f_2^{m_2}m_2)\right] \tag{18}$$

其中，C_2 为车辆公里费用，单位：元/(辆·km)；L_{ab} 为小交路OD站 S_a 和 S_b 之间的距离，单位：km.

固定成本 C_f 主要体现为车辆购置成本，与车辆的运用数量及车辆固定成本有关，即

$$C_f = C_3\left[T_{total}(f_1^{m_1}m_1 + f_1^{m_2}m_2) + T_{ab}(f_2^{m_1}m_1 + f_2^{m_2}m_2)\right] \tag{19}$$

其中，C_3 为车辆固定成本，单位：元/辆；T_{total} 和 T_{ab} 分别为大小交路的列车周转时间，单位：h. 鉴于本研究仅考虑上行方向，列车周转时间可表示为

$$T_{total} = \sum_{e=1}^{N-1}\frac{L_e}{v} + \sum_{k=1}^{N} t_{ks} + \frac{t_z}{3\,600} \tag{20}$$

$$T_{ab} = \sum_{e=a}^{b-1}\frac{L_e}{v} + \sum_{k=a}^{b} t_{ks} + \frac{t_z}{3\,600} \tag{21}$$

其中，e 为区间代号；L_e 为区间 e 的运行里程，单位：km；v 为列车运行速度，单位：km/h；t_{ks} 为列车在第 k 站的停站时长，单位：h；t_z 为列车折返作业时间，单位：s.

鉴于变动成本和固定成本之间存在较大的数量级差异，为了更全面地评估二者对列车开行方案的影响，参考文献[9]，将固定成本缩小 η 倍，实现两者数量级的统一. 最小化企业运营总成本 Z_3 表示为

$$\min Z_3 = C_v + \frac{C_f}{\eta} \tag{22}$$

2.3 约束条件

1）碳排放约束

为响应“双碳”政策，构建绿色城市轨道交通运输体系，本研究将运营期间城轨线路的总体碳排放量规定在阈值 $C_{t\max}$ 以下，考虑到不同城市和线路条件下地铁碳排放强度存在差异，且通常低于0.05 kg/（人·km），因此，$C_{t\max}$ 为

$$C_{t\max} = 0.05\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} q_{ij} l_{ij} \tag{23}$$

其中，l_{ij} 为从 S_i 出发到 S_j 下车的距离，单位：km.

列车的碳排放量与列车牵引能耗有关，牵引能耗又等于列车黏着牵引力和距离的乘积. 列车的黏着牵引力与列车的运行速度关联性较强，参考文献[2-3,5]，为简化问题并降低模型复杂性，假设列车运行速度为定值. 参考文献[17]列车牵引能耗的碳排放因子为0.72 kg·(kWh)$^{-1}$（以 CO_2 计），因此，碳排放约束可以表示为

$$\frac{0.72\sum_{m\in M} Q_m \mu g(f_1^m L_{total} + f_2^m L_{ab})}{3.6} \leqslant C_{t\max} \tag{24}$$

其中，Q_m 为 m 节编组列车的质量，单位：t；μ 为黏着系数，$\mu = 0.24 + 12/(100 + 8v)$，$v$ 为列车运行速度，单位：km/h；g 为重力加速度，取 $g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$.

2）满载率约束

任一区间 e 的实际满载率必须介于最小满载率 $\theta_{\min}$ 和最大满载率 $\theta_{\max}$ 之间，即

$$\begin{cases} \theta_{\min} \leqslant \dfrac{\sum_{i=1}^{e}\sum_{j=e+1}^{n} q_{ij}}{C_{m_1} f_1^{m_1} + C_{m_2} f_1^{m_2}} \leqslant \theta_{\max}, \\ \qquad \forall e \in \{1,2,\cdots,a-1\} \cup \{b,\cdots,N-1\} \\ \theta_{\min} \leqslant \dfrac{\sum_{i=1}^{e}\sum_{j=e+1}^{n} q_{ij}}{C_{m_1}(f_1^{m_1} + f_2^{m_1}) + C_{m_2}(f_1^{m_2} + f_2^{m_2})} \leqslant \theta_{\max}, \\ \qquad \forall e \in \{a, a+1,\cdots,b-1\} \end{cases} \tag{25}$$

3）线路通过能力约束

列车的开行频率不能超过线路的通过能力 f_0

http://journal.szu.edu.cn

（单位：列 / h），即

$$f_1^{m_1}+f_1^{m_2}+f_2^{m_1}+f_2^{m_2}\leqslant f_0 \tag{26}$$

4）最小发车频率约束

该线路的列车开行频率不能小于最小发车频率 $f_{\min}$（单位：列 / h），即

$$f_1^{m_1}+f_1^{m_2}\geqslant f_{\min} \tag{27}$$

5）运用车辆约束

使用的车辆数不能超过可用的车辆总数 W，即

$$T_{\text{total}}(f_1^{m_1}m_1+f_1^{m_2}m_2)+T_{ab}(f_2^{m_1}m_1+f_2^{m_2}m_2)\leqslant W \tag{28}$$

6）折返站位置约束

小交路OD站间的相隔站数要大于最小间隔站数 $\alpha_{\min}$（单位：个），同时，小交路终点站位置 b 应大于起点站位置 a，即

$$1\leqslant a<b\leqslant n \tag{29}$$

$$b-a\geqslant\alpha_{\min} \tag{30}$$

7）决策变量取值约束

$$f_1^{m_1},f_1^{m_2},f_2^{m_1},f_2^{m_2},a,b\in\mathbf{N} \tag{31}$$

2.4　多目标模型的转换

本模型3个目标函数无法同时求得最优解，需要将多目标优化问题转换为单目标优化问题．考虑3个目标量纲不同，采用最大-最小归一化法对目标函数进行处理，即

$$\min U=\sum_{i=1}^{3}\omega_i\left(\frac{Z_i-Z_{i\min}}{Z_{i\max}-Z_{i\min}}\right) \tag{32}$$

其中，$Z_{i\min}$ 和 $Z_{i\max}$ 分别为模型的3个目标函数在上述约束条件下的最小值和最大值；ω_i 为第 i 个目标的权重系数，满足 $\omega_1+\omega_2+\omega_3=1$．为均衡各目标，且突出绿色导向下供需协同目标的优先性，将权重设置为 $\omega_1=0.4$、$\omega_2=0.3$ 及 $\omega_3=0.3$．

$$\boldsymbol{X}(d+1)=\begin{cases}\boldsymbol{X}^*(d)-F\left|C\boldsymbol{X}^*(d)-\boldsymbol{X}(d)\right|, & P<0.5\text{且}|F|<1\\ \left|\boldsymbol{X}^*(d)-\boldsymbol{X}(d)\right|\mathrm{e}^{\sigma l}\cos(2\pi l)+\boldsymbol{X}^*(d), & P\geqslant 0.5\\ \boldsymbol{X}_{\text{rand}}(d)-F\left|C\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(d)-\boldsymbol{X}(d)\right|, & P<0.5\text{且}|F|\geqslant 1\end{cases} \tag{33}$$

其中，$\boldsymbol{X}(d)$ 为第 d 次迭代的鲸鱼位置；$\boldsymbol{X}^*(d)$ 为种群在第 d 次迭代的最优解；F 为体现鲸鱼行动方式的系数变量，$F=2\varepsilon r-\varepsilon$；$\varepsilon$ 为[0, 2]的递减参数，$\varepsilon=2-2d/d_{\max}$；$d_{\max}$ 为算法的最大迭代次数；r 为[0, 1]的随机数；P 为是否螺旋捕食的概率；σ 为螺旋控制参数；l 为[−1，1]的随机数；$\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(d)$ 为第 d 次迭代的鲸鱼种群中随机的1个鲸鱼位置；C 为体现鲸鱼行动方式的系数变量，$C=2r$．

由于在鲸鱼捕食过程中参数 ε 呈线性变化，前期全局探索及后期局部优化能力不够平衡，因此，采用非线性递减方式平衡二者[20]，参数控制策略为

3　算法设计

鲸鱼优化算法（whale optimization algorithm，WOA）是为了模拟座头鲸群的捕食行为而提出的[18]，算法参数少、结构简单，但仍存在收敛速度慢和早熟的缺点，制约了大规模问题的求解精度和求解效率；模拟退火（simulated annealing，SA）算法是模拟固体物质的热退火工艺提出的，具有结构简单、实施方便、执行效率高等特点，但对初始解依赖性强的缺点也限制了其应用．本研究结合两种算法的优点，设计符合本模型特点的自适应退火-鲸鱼算法（adaptive annealing - whale optimization algorithm，AA-WOA），提高了寻优速度和精度，避免陷入局部最优解．

3.1　自适应退火-鲸鱼算法设计策略

1）基于参数非线性变化的全局探索与局部优化平衡策略

鲸鱼优化算法解的更新方式分别为：包围猎物、起泡网捕食和随机搜索[19]．座头鲸在捕捉猎物时，不仅通过螺旋游动接近猎物，还会逐渐缩小围捕范围，此外，座头鲸还会以系数 F 的变化为依据进行随机搜索，位置更新方式为

$$\varepsilon=2-2\sin\left(\frac{\pi d}{2d_{\max}}\right) \tag{34}$$

2）增强跳出局部最优的能力

算法设计中利用模拟退火算法的Metropolis准则，以一定的概率接受较差的解，促进算法跳出局部最优，展开全局搜索．Metropolis准则表示为

$$P(d)=\begin{cases}1, & U_{\min}(d)\leqslant U_{\text{best}}(d-1)\\ \mathrm{e}^{-\frac{U_{\min}(d)-U_{\text{best}}(d-1)}{T(d)}}, & U_{\min}(d)>U_{\text{best}}(d-1)\end{cases} \tag{35}$$

其中，$P(d)$ 为第 d 次迭代时接受新解的概率；$T(d)$ 为第 d 次迭代时的温度；$U_{\text{best}}(d)$ 为第 d 次迭代时的全局最优适应度值；$U_{\min}(d)$ 为第 d 次迭代时最小的

http://journal.szu.edu.cn

适应度值.

每次迭代的温度$T(d)$可根据初始化群体的信息计算为

$$T(d)=\begin{cases}U_{\text{best}}(d-1)/\ln 5, & d=1\\ \delta T(d-1), & d>1\end{cases} \tag{36}$$

其中，δ为降温系数，取$\delta=0.95$[21].

基于上述策略，在每次迭代更新全局最优解时．生成1个(0，1]的随机数χ，与概率$P(d)$进行对比，根据式(37)判断是否接受新解，以更新全局最优解$\boldsymbol{X}^*(d)$，

$$\boldsymbol{X}^*(d)=\begin{cases}\boldsymbol{X}_{\min}(d), U_{\min}(d)\leqslant U_{\text{best}}(d-1)\\ \boldsymbol{X}^*(d-1), U_{\min}(d)>U_{\text{best}}(d-1)\text{且}P(d)<\chi\\ \boldsymbol{X}_{\min}(d), U_{\min}(d)>U_{\text{best}}(d-1)\text{且}P(d)\geqslant\chi\end{cases} \tag{37}$$

其中，$\boldsymbol{X}_{\min}(d)$为第d次迭代时当前鲸鱼种群中适应度值最小的位置.

3）采用提高求解效率的自适应调整策略

设置迭代次数阈值d_1和d_2，令$0<d_1<d_2<d_{\max}$，在算法运行过程中，当$d<d_1$时，优化所有决策变量值；当$d_1\leqslant d<d_2$时，固定a和b，仅优化$f_1^{m_1}$、$f_1^{m_2}$、$f_2^{m_1}$及$f_2^{m_2}$；当$d\geqslant d_2$时，固定a、b、$f_1^{m_1}$及$f_1^{m_2}$，仅优化$f_2^{m_1}$和$f_2^{m_2}$；当$d\geqslant d_{\max}$时，算法终止，得出最优解.

3.2 算法求解步骤

本研究AA-WOA算法流程见图4．$\boldsymbol{X}_0$为生成的初始鲸鱼种群，可表示为

$$\boldsymbol{X}_0=\begin{bmatrix}f_1^{m_1 1} & f_1^{m_2 1} & f_2^{m_1 1} & f_2^{m_2 1} & a^1 & b^1\\ f_1^{m_1 2} & f_1^{m_2 2} & f_2^{m_1 2} & f_2^{m_2 2} & a^2 & b^2\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ f_1^{m_1 D} & f_1^{m_2 D} & f_2^{m_1 D} & f_2^{m_2 D} & a^D & b^D\end{bmatrix}$$

其中，D为种群规模.

4 算例验证

4.1 基础数据

参考文献[9]，以E城市早高峰时段(07∶00—08∶00)某城轨线路上行方向客流为例，该时段区间断面客流量在空间上呈中间高、两端低的典型凸起型客流分布特征，该线路列车采用4节和6节编组模式，线路沿途共设31座车站，总长48.827 km.

参考文献[9]，模型中C_{m_1}和C_{m_2}分别取1 210人/列和1 860人/列；$t_k=3.02$ s；$\mu=5$对；$C_1=25$元/h；$C_2=60$元/(辆·km)；$f_0=30$列/h；$f_{\min}=$

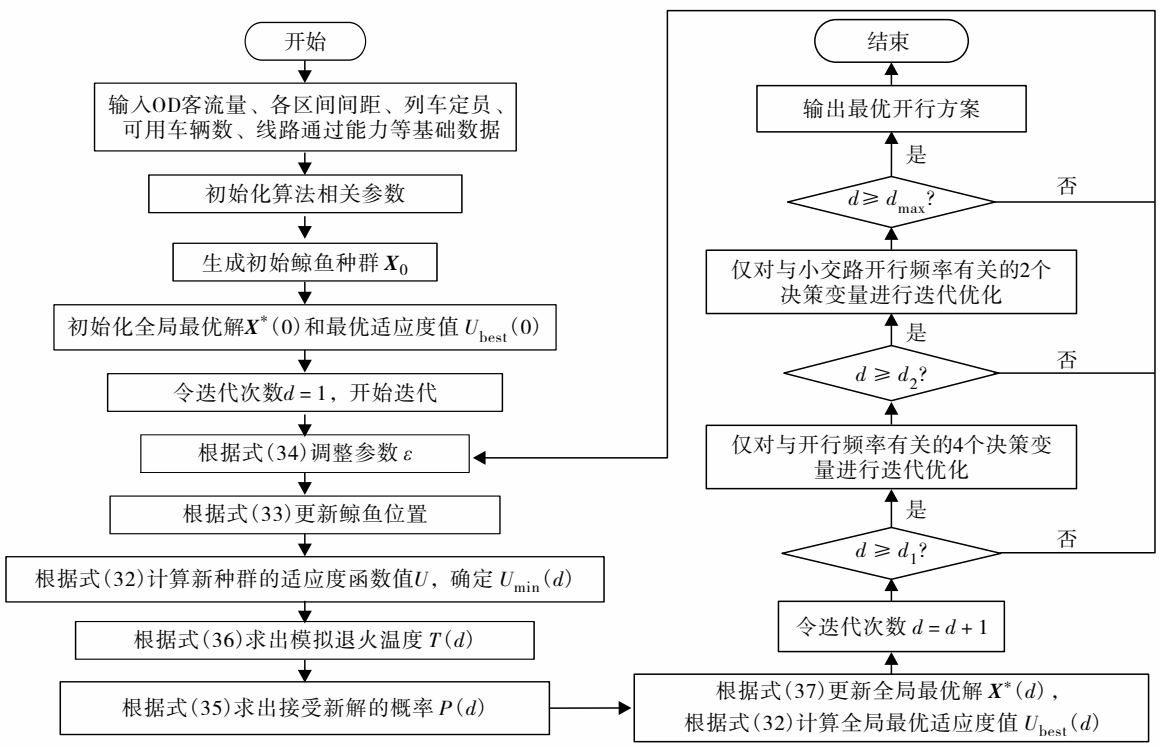

图4 AA-WOA算法流程

Fig. 4 AA-WOA algorithm process.

http://journal.szu.edu.cn

6 列 / h；W = 210 辆．参考文献[2]，t_z = 110 s；C_3 = 650 万元/辆．参考文献[3]，$\alpha_{\min}$ = 8 个；$\theta_{\min}$ = 0.5；Q_{m_1} = 146.2 t；Q_{m_2} = 222.2 t；v = 35 km / h．参考文献[6]，t_{extra} = 22.5 s；$\theta_{\max}$ = 1.3．经过多次计算，取 $\eta = 1 \times 10^5$．

算法参数设计的合理性决定了计算性能，因此，在采用 AA-WOA 算法时，应先设置合理的算法参数取值．除以上参数设定外，经过多次测算求解，将算法相关参数取值为 D = 300、d_1 = 100、d_2 = 200 及 $d_{\max}$ = 500．

4.2　求解结果分析

算例计算过程均通过 Python 编程实现．迭代 343 次后，适应度值 U 逐渐稳定并收敛至最小值 0.551，各类列车的开行频率分别为 $f_1^{m_1}$ = 4 对 / h、$f_1^{m_2}$ = 4 对 / h、$f_2^{m_1}$ = 3 对 / h 及 $f_2^{m_2}$ = 7 对 / h，小交路列车和大交路列车发车频率比值为 10∶8，小交路的 OD 站点分别设置在 a = 6 和 b = 23 处．

4.2.1　模型有效性分析

将本模型与单一交路多编组模型、大小交路短编组模型及大小交路长编组模型进行对比，均采用 AA-WOA 算法进行算例求解．结果表明，单一交路多编组模型的最优解为 $f_1^{m_1}$ = 12 对 / h 和 $f_1^{m_2}$ = 9 对 / h，$f_2^{m_1}$ 和 $f_2^{m_2}$ 均为 0，a 和 b 不存在，适应度值 U = 0.688；大小交路短编组模型的最优解为 $f_1^{m_1}$ = 15 对 / h 和 $f_2^{m_1}$ = 11 对 / h，$f_1^{m_2}$ 和 $f_2^{m_2}$ 均为 0，小交路的 OD 站点分别设置在 a = 7 和 b = 22，U = 0.646；大小交路长编组模型的最优解为 $f_1^{m_2}$ = 9 对 / h 和 $f_2^{m_2}$ = 8 对 / h，$f_1^{m_1}$ 和 $f_2^{m_1}$ 均为 0，小交路的 OD 站点分别设置在 a = 7 和 b = 22，U = 0.623．根据上述最优解，计算每个模型的 3 个目标函数值，结果如图 5．可见，相比单一交路多编组模型，本模型的供需协同性优化了 185.92、各类乘客出行总成本减少 17.8% 及企业运营总成本下降 29.09%；相比于大小交路短编组模型，本模型的供需协同性优化了 53.15、各类乘客出行总成本减少 11.45% 及企业运营总成本下降 5.67%；相比大小交路长编组模型，本模型的供需协同性优化了 36.07、各类乘客出行总成本减少 8.34% 及企业运营总成本下降 4.97%．根据结果计算 4 个模型的碳排放量，结果见表 1．可见，相比对比模型，本模型的碳排放量分别减少了 25.86%、14.39% 及 10.82%．

采用大小交路及多编组模式可以使城市轨道交通在降低碳排放的基础上提高线网运能供给与客流需求之间的供需协同性，多编组策略对供需协同性和碳排放的优化更为明显，且节约了各类乘客的出行总成本和企业运营总成本．

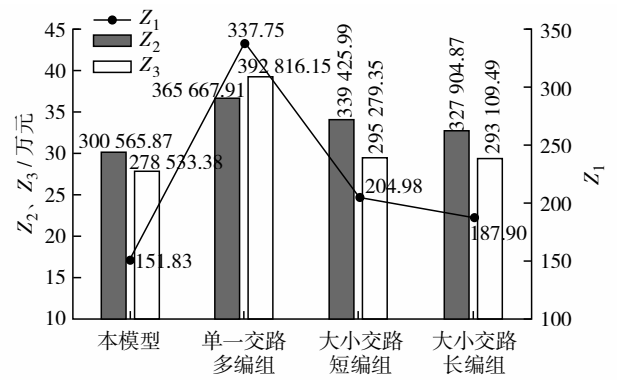

图 5　四种模型的 3 个目标函数值对比

Fig. 5　Comparison chart of three objective function values by four models. The solid line with circles, gray bars and white bars represent supply-demand coordination, total passenger travel cost and total enterprise operating cost, respectively.

表 1　四种模型的碳排放量

Table 1　Carbon emissions of four models

模型	碳排放量 / kg
本研究	64 925.43
单一交路多编组	87 572.70
大小交路短编组	75 836.02
大小交路长编组	72 799.64

4.2.2　算法计算结果对比

采用 WOA 算法和 SA 算法作为本研究 AA-WOA 算法的对比算法，使用 Python 编程在同一台计算机上求解本模型，结果见图 6．当采用 WOA 算法迭代到 359 次时，U 趋于稳定并收敛到最小值 0.596，

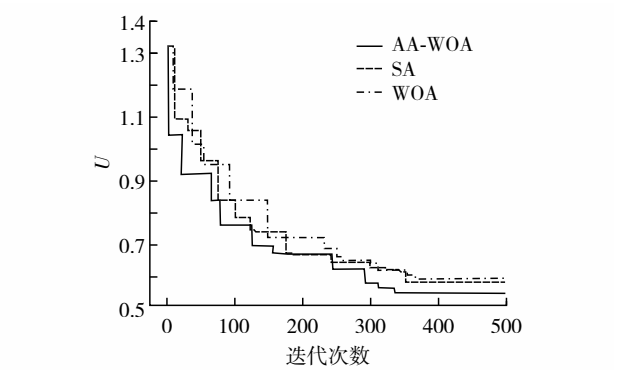

图 6　三种算法的迭代过程

Fig. 6　Iterative process diagram of (a) AA-WOA algorithm (solid line), (b) SA algorithm (dashed line) and (c) WOA algorithm (dot-dashed line).

http://journal.szu.edu.cn

各类列车开行频率分别为：$f_1^{m_1}$ = 3对/h、$f_1^{m_2}$ = 5对/h、$f_2^{m_1}$ = 4对/h及$f_2^{m_2}$ = 7对/h，小交路OD分别设置在a = 7和b = 23；采用SA算法，迭代到371次时，U趋于稳定并收敛到最小值0.584，各类列车开行频率分别为$f_1^{m_1}$ = 4对/h、$f_1^{m_2}$ = 5对/h、$f_2^{m_1}$ = 4对/h及$f_2^{m_2}$ = 6对/h，小交路OD分别设置在a = 6和b = 22. 可见，AA-WOA算法具有更快的求解速率和更高的求解质量. 计算基于3种算法求解结果的3个目标函数值，结果见图7. 可见，相比于WOA算法，AA-WOA算法计算的供需协同性优化了1.39、各类乘客出行总成本减少1.97%及企业运营总成本下降2.3%；相比于SA算法，AA-WOA算法计算的供需协同性优化了17.53、各类乘客出行总成本减少2.91%及企业运营总成本下降4.19%. 3种算法的碳排放量见表2，可见，AA-WOA算法计算的碳排放量分别减少2.73%和5.12%. 因此，AA-WOA算法更加符合本模型特征，求解质量和效率俱佳，算法设计有效.

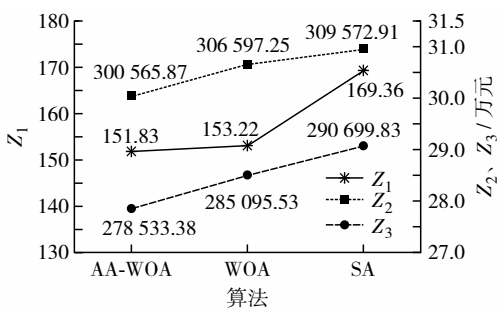

图7 三种算法的3个目标函数值对比

Fig. 7 Comparison of objective function Z_1 (solid line with stars), Z_2 (dotted line with squares) and Z_3 (dashed line with circles) values across three algorithms.

表2 三种算法计算的碳排放量

Table 2 Carbon emissions calculated by three algorithms

算法	碳排放量/kg
AA-WOA	64 925.43
WOA	66 747.67
SA	68 429.88

4.2.3 目标权重敏感性分析

考虑到供需协同目标的优先性，首先固定目标Z_1的权重ω_1 = 0.4，并以0.1为步长枚举其他权重组合进行比较分析，结果见表4. 可见，当权重ω_2增大时，各类乘客出行总成本呈下降趋势，说明决策者更加侧重乘客利益，通过提高列车开行频率和增加小交路折返站距离，有效降低乘客出行成本. 与此同时，供需协同性目标值呈现先减小后增大趋势，说明初期通过增加开行频率和调整折返站距离改善了供需匹配度，提升了供需协同效果，但随着ω_2进一步增大，过度的资源投入导致供需协同效果减弱. 随着企业成本权重ω_3增加，各类列车的开行频率和小交路折返站距离逐渐减少，企业运营总成本和碳排放量逐步降低. 适应度值U随ω_2增加表现为先上升后下降的趋势，反映出优化结果受多重因素交互作用的影响. 因此，决策者应根据具体目标的优先级，合理调整权重设置，以实现列车开行方案的最优配置.

表4 不同权重组合下的优化结果

Table 4 Optimization results under different weight combinations

$(\omega_1,\omega_2,\omega_3)$	$f_1^{m_1}$/(对·h^{-1})	$f_1^{m_2}$/(对·h^{-1})	$f_2^{m_1}$/(对·h^{-1})	$f_2^{m_2}$/(对·h^{-1})	a	b	Z_1	Z_2/元	Z_3/元	碳排放/kg	U
(0.4,0.1,0.5)	3	4	3	6	7	20	177.89	347 469.94	236 134.74	53 103.49	0.493
(0.4,0.2,0.4)	3	4	3	7	7	21	156.48	328 670.95	249 003.27	56 663.56	0.517
(0.4,0.3,0.3)	4	4	3	7	6	23	151.83	300 565.87	278 533.38	64 925.43	0.551
(0.4,0.4,0.2)	4	6	4	7	6	23	215.35	255 520.81	326 216.02	78 427.76	0.532
(0.4,0.5,0.1)	6	6	5	9	5	25	296.54	236 036.87	357 988.32	87 236.94	0.486

固定权重ω_3 = 0.3时，以0.1为步长枚举其他权重组合进行比较分析，结果见图8. 可见，随着ω_1增大，通过减少列车开行频率和小交路折返站距离来优化资源配置，进而降低Z_1，提高供需协同效果. 此时，各类乘客的出行总成本逐步增加，而企业运营总成本和碳排放量逐渐降低. 当3个目标权重的比例达到4∶3∶3时，列车开行方案趋于稳定，不再发生显著变化. 类似地，当固定ω_2 = 0.3时，随着ω_1增大，优化通过增加列车开行频率和小交路折返站距离来提升供需协同效果，企业成本和碳排放量增加，而乘客出行总成本逐步减少，最终优化结果不再发生显著变化. 因此，在制定列车开行

http://journal.szu.edu.cn

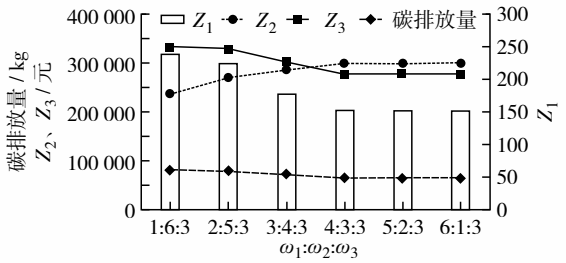

图 8　权重系数对各目标的影响

Fig. 8　Influence of weight coefficients on each objective. The white bars, circle-dotted line, square-solid line and diamond-dashed line represent supply-demand coordination, total passenger travel cost, total enterprise operating cost and carbon emissions.

方案时应关注不同目标之间的平衡.

5　结　论

1）根据绿色发展理念，考虑优化配置交通资源的目标，在深入剖析乘客出行行为与偏好的基础上，综合考虑运能供给与客流需求的协同关系、乘客出行成本与企业运营效益，以及包括碳排放约束的多种现实约束条件，构建绿色导向下供需协同的城轨列车开行方案多目标优化模型，结合模型特性，设计一种自适应退火-鲸鱼算法进行模型求解，并通过算例验证了模型与算法的有效性，为制定更加科学合理的城轨列车开行方案提供了理论支撑，推动城市轨道交通的绿色可持续发展.

2）本研究设计的自适应退火-鲸鱼算法融合了鲸鱼算法与模拟退火算法的优势，相较于传统算法，在计算迭代次数和适应度值方面优势显著，为其在开行方案中的应用提供参考.

3）相比于单一交路和单一编组模式，大小交路、多编组模式在满足碳排放约束下，在降低乘客出行总成本和企业运营总成本的同时，能够有效提升供需协同性，优化了运能资源配置，减少了碳排放，充分契合绿色可持续发展的要求.

4）提出运能供给与客流需求动态平衡的理念，强调精细化的运能资源配置，为城轨开行方案的优化设计提供新思路.

此外，本研究仅考虑单线路、单方向及站站停模式下的列车开行方案，未来可进一步拓展至多线路、多方向及灵活停站的复杂运营场景，以增强方案的适应性.

基金项目：甘肃省科技计划资助项目(24JRRA865，25JRRA220)；国家自然科学基金资助项目(72361020)；中央引导地方科技发展基金资助项目(25ZYJA015)

作者简介：杨雯雯(yangwenwen199302@163.com)，兰州交通大学博士研究生．研究方向：轨道交通运营决策优化．

引　　文：杨雯雯，孟学雷，高如虎，等．绿色导向下供需协同的城轨列车开行方案优化[J]．深圳大学学报理工版，2026，43(1)：36-46.

参考文献 / References：

[1] FENG Tao, LUSBY R M, ZHANG Yongxiang, et al. Integrating train service route design with passenger flow allocation for an urban rail transit line [J]. European Journal of Operational Research, 2024, 313(1): 146-170.

[2] 戴延泽，占曙光．考虑碳排放的城轨开行大小交路方案分析[J]．铁道科学与工程学报，2022，19(12)：3546-3556.
DAI Yanze, ZHAN Shuguang. Analysis of full-length and short-turn routing of urban rail transit considering carbon emission [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3546-3556. (in Chinese)

[3] 林立，孟学雷，程晓卿，等．考虑碳排放效果的城轨列车开行方案编制方法[J]．交通信息与安全，2023，41(5)：176-184.
LIN Li, MENG Xuelei, CHENG Xiaoqing, et al. A method for developing service plan of urban rail train considering carbon emissions impacts [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(5): 176-184. (in Chinese)

[4] 冉昕晨，陈绍宽，柏赟，等．应对潮汐客流的城市轨道交通列车节能和乘客节时运行图优化模型[J]．中国铁道科学，2022，43(1)：171-181.
RAN Xinchen, CHEN Shaokuan, BAI Yun, et al. Train energy-efficient and passenger time-saving timetable optimization model for urban rail transit line with tidal passenger flow [J]. China Railway Science, 2022, 43(1): 171-181. (in Chinese)

[5] 杨雯雯，孟学雷，高如虎，等．考虑运能利用和碳排放的绿色城轨开行方案研究[J]．交通运输系统工程与信息，2025，25(1)：122-132.
YANG Wenwen, MENG Xuelei, GAO Ruhu, et al. Train operation plan of green urban rail transit considering transportation capacity utilization and carbon emissions [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(1): 122-132. (in Chinese)

[6] 姚恩建，张金萌，郇宁．效率与公平导向下城轨大小交路开行方案优化[J]．华南理工大学学报自然科学版，2020，48(5)：41-48，57.
YAO Enjian, ZHANG Jinmeng, HUAN Ning. Equality-efficiency balance-oriented optimization of long-short route strategy in urban rail transit [J]. Journal of South

http://journal.szu.edu.cn

China University of Technology Natural Science Edition, 2020, 48(5): 41-48, 57. (in Chinese)

[7] 王磊，李思杰，刘志钢，等. 基于供需匹配的城市轨道交通大小交路开行方案优化[J]. 铁道运输与经济，2023，45(6)：125-131.
WANG Lei, LI Sijie, LIU Zhigang, et al. Optimization of urban rail transit operation scheme of full-length and short-turning routes based on supply and demand matching [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(6): 125-131. (in Chinese)

[8] ZHANG Miao, WANG Yihui, SU Shuai, et al. A short turning strategy for train scheduling optimization in an urban rail transit line: the case of Beijing subway line 4 [J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018(1): 5367295.

[9] 林立，孟学雷，程晓卿，等. 疫情常态化防控条件下城轨列车开行方案研究[J]. 铁道科学与工程学报，2022，19(12)：3515-3525.
LIN Li, MENG Xuelei, CHENG Xiaoqing, et al. Research on train operation plan of urban rail transit under the condition of normalized epidemic prevention and control [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3515-3525. (in Chinese)

[10] MO Pengli, D′ARIANO A, YANG Lixing, et al. An exact method for the integrated optimization of subway lines operation strategies with asymmetric passenger demand and operating costs [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 149: 283-321.

[11] 李正洋，赵军，彭其渊. 考虑多交路多编组的城市轨道线路列车交路计划优化[J]. 铁道学报，2020，42(6)：1-11.
LI Zhengyang, ZHAO Jun, PENG Qiyuan. Optimizing the train service route plan in an urban rail transit line with multiple service routes and multiple train sizes [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(6): 1-11. (in Chinese)

[12] DELLE SITE P, FILIPPI F. Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1998, 32(1): 19-38.

[13] GHAEMI N, CATS O, GOVERDE R M P. A microscopic model for optimal train short-turnings during complete blockages [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 105: 423-437.

[14] 任艾，孟令云，王义惠，等. 面向客流的市域与城轨贯通运营下快慢车开行方案优化[J]. 北京交通大学学报，2024，48(4)：153-163.
REN Ai, MENG Lingyun, WANG Yihui, et al. Optimization of express/slow train operations in integrated suburban and urban rail systems based on passenger demand [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(4): 153-163. (in Chinese)

[15] 孙国锋，景云，马亚雯. 考虑旅客多维出行需求的动态列车开行方案优化[J]. 铁道学报，2022，44(11)：10-18.
SUN Guofeng, JING Yun, MA Yawen. Optimization of dynamic train line planning considering multi-dimensional travel demand of passengers [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(11): 10-18. (in Chinese)

[16] ZHANG L, WANG J, LI Y. Passenger travel behavior and preferences: insights from a large-scale mobility survey [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 131: 103422.

[17] 杨洋，王雪纯，袁振洲，等. 基于碳回收期理论的城市轨道交通碳减排效应测算[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(5)：1-11，23.
YANG Yang, WANG Xuechun, YUAN Zhenzhou, et al. Calculation for carbon emission reduction effect of urban rail transit based on carbon recovery period theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 1-11, 23. (in Chinese)

[18] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.

[19] 褚鼎立，陈红，王旭光. 基于自适应权重和模拟退火的鲸鱼优化算法[J]. 电子学报，2019，47(5)：992-999.
CHU Dingli, CHEN Hong, WANG Xuguang. Whale optimization algorithm based on adaptive weight and simulated annealing [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 992-999. (in Chinese)

[20] 安海洋，郭开心，王亚斌. 基于混杂模型和改进鲸鱼算法的升压电路故障检测方法[J/OL]. 探测与控制学报. (2024-12-20)[2025-01-20]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/61. 1316. tj. 20241219. 1341. 004. html.
AN Haiyang, GUO Kaixin, WANG Yabin. A fault detection method of booster circuit based on hybrid model and improved whale optimization algorithm [J/OL]. Journal of Detection & Control. (2024-12-20) [2025-01-20]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/61. 1316. tj. 20241219. 1341. 004. html. (in Chinese)

[21] 路复宇，童宁宁，冯为可，等. 自适应杂交退火粒子群优化算法[J]. 系统工程与电子技术，2022，44(11)：3470-3476.
LU Fuyu, TONG Ningning, FENG Weike, et al. Adaptive hybrid annealing particle swarm optimization algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(11): 3470-3476. (in Chinese)

【中文责编：方圆；英文责编：淡紫】

http://journal.szu.edu.cn