

# 群组模式下单线重载铁路运行图编制方法

彭超凡<sup>1</sup>, 吕红霞<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都

<sup>2</sup>西南交通大学综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都

<sup>3</sup>西南交通大学综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都

收稿日期: 2024年9月27日; 录用日期: 2024年10月31日; 发布日期: 2024年11月7日

## 摘要

列车群组运行是以加密方式扩充重载铁路运能的重要途径, 基于群组运行模式特点, 以提升群组运行模式下单线重载铁路列车运行图铺画效率为目标, 提出单线重载铁路群组列车区间运行时分、停站时分、机车折返作业时间等基础信息表示方法, 分析群组运行模式下车站间隔时间、不同列车交会、同向列车禁止越行等相关约束。构建基于列车停站时分最短与机车折返作业时间最短的运行图编制模型。提出一种基于改进惯性权重、学习因子、Pareto最优解集更新方法及添加交叉变异操作的多目标粒子群求解算法, 最后以包神北线为例, 对模型进行了验证。结果表明, 对比现有包神北线重载铁路运输能力提高47.6%, 同时降低线路利用率6.5%。

## 关键词

重载铁路运输, 单线铁路, 群组列车, 运行图编制, 多目标优化

# Compiling Method of Single Track Heavy Haul Railway Operating Diagram in Group Tracking Mode

Chaofan Peng<sup>1</sup>, Hongxia Lyu<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

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

<sup>3</sup>National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

文章引用: 彭超凡, 吕红霞. 群组模式下单线重载铁路运行图编制方法[J]. 交通技术, 2024, 13(6): 412-421.  
DOI: 10.12677/ojtt.2024.136045

## Abstract

Train group operation is an important way to enhance the capacity of overloaded railways through increased frequency. This study aims to improve the efficiency of train schedule planning for single-track overloaded railways under the group operation model. It proposes methods for representing essential information such as interval running times, station stop times, and locomotive turnaround times. The analysis includes constraints like station spacing, train passing, and prohibiting overtaking for same-direction trains. A scheduling model is constructed focusing on minimizing stop times and turnaround times. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm is introduced, featuring adaptive inertia weights, learning factors, and Pareto optimal solution updates with crossover and mutation operations. Finally, the model is validated using the Baoshen North Line, demonstrating a 47.6% increase in transport capacity while reducing line utilization by 6.5%.

## Keywords

Heavy-Haul Railway Transportation, Single-Track Railway, Group Trains, Timetable Scheduling, Multi-Objective Optimization

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

基于自组网的列车群组运行控制系统,能够协同控制两列或多列车的速度和间隔,在没有物理连接的情况下形成一个自协调逻辑群,实现群体控制与调度[1]。该技术大大缩短行车间隔,降低列车追车间隔时间,且彻底解决由于列车过长引起的纵向力问题[2]。基于该项的技术先进性及其对重载铁路运输能力提升的作用较大,研究群组运行模式下重载铁路列车运行图优化技术具有重要意义。

在现有文献中,针对既有非群组运行模式下列车运行图研究方面,江峰[3]通过时空网络构建了一个处理大规模货运列车运行图问题的整数规划模型,采用启发式算法解决该问题。穆策[4]针对货运列车运行图与施工维修天窗一体编制的问题,通过将维修作业视为虚拟列车,构建模型并对其求解。林柏梁[5]考虑机车交路对货物列车开行方案的影响,建立了双层规划模型,并采用模拟退火算法求解。高如虎[6]在需求驱动下,分别构建了无新增快运专列的快运箱配装优化模型和新增快运专列时刻表及配装方案综合优化模型。针对运行图求解算法方面,倪少权[7]在基本列车运行图的基础上,构建市场导向动态货运列车运行线挑选模型,并运用模拟退火算法求解。针对列车群组运行方案研究方面,卓琴羽[8]等建立混合整数非线性规划模型,并设计了一种模拟退火非支配排序算法,有效求解重载铁路混编群组列车的开行方案编制问题。游婷[9]等以缩短乘客旅行时间和提高列车运输效率为目标,提出虚拟编组列车运行方案的优化方法,并基于城市轨道交通线路早高峰客流数据给出优化运行方案设计结果。

综上,既有研究主要针对的是既有模式下铁路列车运行图优化问题,缺乏列车群组运行模式下重载列车运行图优化研究,难以满足群组运行模式下重载铁路列车运行图编制需求。因此考虑构建群组运行模式下重载列车运行图编制原理与方法,以实现货运需求与运能的动态匹配及运输效能提升十分迫切。

## 2. 问题提出

### 2.1. 群组运行图特点

在运输组织条件相对较弱、运输能力更为紧张的单线铁路施行群组运行模式可以获得更大的运能提升, 因而本文着重分析单线重载铁路群组列车车站作业、区间运行、机车周转过程, 总结得到单线铁路群组列车运行图存在以下特点:

#### (1) 群组运行图中运行“线”变为运行“块”

在群组列车运行图中, 相比于传统组合列车“硬连挂”, 群组单元列车之间的“软”间隔无法忽略不计, 造成了群组列车运行时存在组内间隔时间。该间隔时间与组群规模大小以及群组列车发车方法有关, 在群组单元列车区间追踪运行时不变, 因此在群组列车运行图编制时将群组列车运行“线”抽象化为运行“块”, 如图1所示。

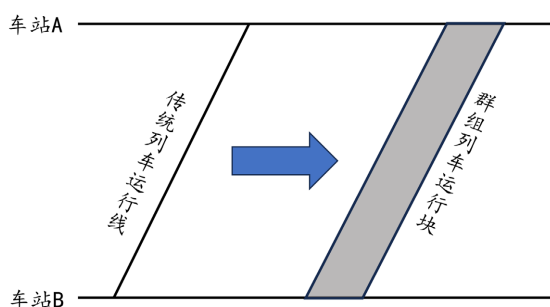


Figure 1. Group train operation “block” diagram

图1. 群组列车运行“块”示意图

#### (2) 重车方向群组列车采取一站直达方式

单线铁路中群组列车需要在车站停车进行交会作业时, 考虑到重载铁路中重车起车较为困难且起车、“充风”、发车作业依次进行, 造成较多的能源、时间浪费, 因此限制群组重车在线路中运行时不进行停车作业, 即重车方向群组列车运行线从始发站直达至终到站, 极大地提高了空车方向列车停站时间。

#### (3) 机车周转时间较长且铺线工作更为复杂

在群组运行模式下, 机车需要更加先进的车车通讯设备, 以更好地完成群组控制系统下达的追踪指令, 因而普通机车无法胜任接续群组单元列车的工作, 造成铺画机车周转图时需要等待接续适合的列车以避免造成机车能力浪费。

### 2.2. 问题描述

本文提出以运行“块”代替运行“线”作为群组列车运行图铺画的基本要素, 为准确描述群组列车运行图铺画的过程, 需给定“运行块”表示方法下群组列车运行的基础信息表示公式; 群组运行模式下单线重载铁路中重车方向与传统重载铁路的“后到先通”会让方式不同, 需要对线路中开行的四种不同状态的列车给定其优先级以顺利完成会让作业; 由于群组机车与普通机车不混用, 模型需考虑机车周转对群组列车运行图铺画的影响, 以达到一定协同编制运行图与机车周转图的效果。

## 3. 模型建立

### 3.1. 模型假设

#### (1) 假设群组列车机车不与普通货运列车机车混用, 两种机车数量充足。

- (2) 假设群组内之开行相同类型的重载单元列车, 普通列车为相同类型的重载单元列车。
- (3) 假设线路中空、重车开行方向确定, 且不存在某一方向空、重车混开的情况, 本模型假定上行方向为重车, 下行方向为空车。
- (4) 假设各技术站内到发线数量固定。
- (5) 假设群组计划与开行方案确定, 即线路中开行的群组列车与普通列车数量确定(群组列车数量以群组整体为单元计算), 成对依序开行且每个开行的群组列车组群规模固定。

### 3.2. 目标函数

(1) 列车总停站时间最少:

由于限制群组列车以一定优先级进行会车, 导致线路中列车的停站等待时间延长, 因而模型以最小化列车在线路中的总停站时间作为目标函数。

$$Min\omega_1 = \sum_{k \in K} \sum_{z_a \in Z} t_{stop}^{k_n, z_a} x_k^{z_a} \quad (1)$$

式中:  $t_{stop}^{k_n, z_a}$  为组群规模为  $n$  的群组列车  $k$  在车站  $z_a$  的停站时间;  $x_k^{z_a}$  为 0~1 变量, 其值为 0 表示列车  $k$  在车站  $z_a$  不停车, 其值为 1 表示列车  $k$  在车站  $z_a$  停车;  $K$  为列车集合;  $Z$  为车站集合;  $n$  为群组列车组群规模, 本文  $n=1$  或 2 (若  $n=1$  则该列车为普通列车)。

(2) 机车的折返接续时间之和最小:

由于限制了列车机车的使用, 导致线路中机车周转接续时间延长, 因而模型以最小化机车的折返接续时间之和作为目标函数。

$$Min\omega_2 = \sum_{\gamma=1}^{\eta} \sum_{i=1}^n \left( t_{lmwk}^{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i, u} \right) x_{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i}^u + \sum_{\gamma=1}^{\eta} \left( t_{lmwk}^{k_{\gamma} \rightarrow k_{\gamma+1}, v} \right) x_{k_{\gamma} \rightarrow k_{\gamma+1}}^v \quad (2)$$

$$t_{lmwk}^{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i, u} = \begin{cases} t_{set}^{k_{\gamma+1}^i, z_{k_{\gamma+1}^i}} - t_{arr}^{k_{\gamma}^i, z_{k_{\gamma}^i}} & \text{当 } t_{set}^{k_{\gamma+1}^i, z_{k_{\gamma+1}^i}} \geq t_{arr}^{k_{\gamma}^i, z_{k_{\gamma}^i}} \text{ 时} \\ t_{set}^{k_{\gamma+1}^i, z_{k_{\gamma+1}^i}} - t_{arr}^{k_{\gamma}^i, z_{k_{\gamma}^i}} + 1440 & \text{当 } t_{set}^{k_{\gamma+1}^i, z_{k_{\gamma+1}^i}} < t_{arr}^{k_{\gamma}^i, z_{k_{\gamma}^i}} \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{lmwk}^{k_{\gamma} \rightarrow k_{\gamma+1}, v} = \begin{cases} t_{set}^{k_{\gamma+1}, z_{k_{\gamma+1}}} - t_{arr}^{k_{\gamma}, z_{k_{\gamma}}} & \text{当 } t_{set}^{k_{\gamma+1}, z_{k_{\gamma+1}}} \geq t_{arr}^{k_{\gamma}, z_{k_{\gamma}}} \text{ 时} \\ t_{set}^{k_{\gamma+1}, z_{k_{\gamma+1}}} - t_{arr}^{k_{\gamma}, z_{k_{\gamma}}} + 1440 & \text{当 } t_{set}^{k_{\gamma+1}, z_{k_{\gamma+1}}} < t_{arr}^{k_{\gamma}, z_{k_{\gamma}}} \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $t_{lmwk}^{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i, u}$  表示群组机车车辆  $u$  完成群组列车  $k_{\gamma}$  的单元列车  $k_{\gamma}^i$  与群组列车  $k_{\gamma+1}$  的单元列车  $k_{\gamma+1}^i$  之间接续作业所耗费的时间;  $t_{lmwk}^{k_{\gamma} \rightarrow k_{\gamma+1}, v}$  表示普通机车车辆  $v$  完成普通列车  $k_{\gamma}$  与普通列车  $k_{\gamma+1}$  之间接续作业所耗费的时间;  $x_{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i}^u$  与  $x_{k_{\gamma} \rightarrow k_{\gamma+1}}^v$  均为 0~1 变量, 其值为 1 时分别表示群组单元车  $k_{\gamma}^i$ 、 $k_{\gamma+1}^i$  通过群组机车车辆  $u$  进行接续, 普通列车  $k_{\gamma}$ 、 $k_{\gamma+1}$  通过普通机车车辆  $v$  进行接续, 其值为 0 时表示未进行机车接续;  $t_{arr}^{k, z_a}$  与  $t_{set}^{k, z_a}$  分别表示列车  $k$  在车站  $z_a$  对应的到达、出发时刻(群组列车以首车计算)。

### 3.3. 约束条件

(1) 列车区间运行时分约束。根据群组列车运行“块”的特点, 所有列车在下一站的到时等于在该站的发时与区间纯运行时分和启停附加时分之, 其中  $t_{int}^{k_n, (z_a, z_b)}$  为车站  $z_b$  的到达时间与车站  $z_a$  的出发时间的差与组群规模为  $n$  时的群组组内总间隔时间  $I_{q,n}^{组内}$  之和, 即列车区间运行时分。

$$t_{int}^{k_n, (z_a, z_b)} = t_{arr}^{k, z_b} - t_{set}^{k, z_a} + I_{q,n}^{组内} \quad (n=1 \text{ 时}, I_{q,n}^{组内} = 0) \quad (5)$$

$$t_{int}^{k_n(z_a, z_b)} = \begin{cases} \frac{O_{z_b \rightarrow z_a}}{\sigma} + x_k^{z_b} \cdot T_{z_b}^{up} + x_k^{z_a} \cdot T_{z_a}^{off}, \forall k \in K_{\downarrow} \\ \frac{O_{z_a \rightarrow z_b}}{\sigma} + x_k^{z_a} \cdot T_{z_a}^{up} + x_k^{z_b} \cdot T_{z_b}^{off}, \forall k \in K_{\uparrow} \end{cases}; (z_a, z_b) \in E \quad (6)$$

式中:  $O_{z_a \rightarrow z_b}$  为车站  $z_a$  至车站  $z_b$  的中心里程;  $T_{z_a}^{up}$ 、 $T_{z_a}^{off}$  分别为列车  $k$  在车站  $z_a$  的起车附加时分和停车附加时分;  $K_{\uparrow}$ 、 $K_{\downarrow}$  分别为上下行列列车集合;  $\sigma$  为重载列车运行限速。

(2) 车站间隔时间约束。群组列车车站到达、出发或通过作业应满足各类间隔的间隔时间标准  $T$ 。

$$\tau_{\text{连}} = t_{arr}^{k+1, z_a} - t_{arr}^{k, z_a} - I_{q,n}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{连}}}; \forall k \in K_{\uparrow}, K_{\downarrow}, z_a \in Z \quad (7)$$

$$\tau_{\text{到发(发到)}} = t_{set}^{k+1, z_a} - t_{arr}^{k, z_a} - I_{q,n}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{到发(发到)}}}; \forall k \in K, z_a \in Z \quad (8)$$

$$\tau_{\text{会}} = t_{set}^{k_{\downarrow}(上), z_a} - t_{arr}^{k_{\uparrow}(下), z_a} - I_{q,n}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{会}}}; \forall k_{\uparrow} \in K_{\uparrow}, \forall k_{\downarrow} \in K_{\downarrow}, z_a \in Z \quad (9)$$

$$\tau_{\text{不}} = t_{arr}^{k_{\uparrow}(下), z_a} - t_{arr}^{k_{\downarrow}(上), z_a} - I_{q,n}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{不}}}; \forall k_{\uparrow} \in K_{\uparrow}, \forall k_{\downarrow} \in K_{\downarrow}, z_a \in Z \quad (10)$$

式中:  $\tau_{\text{连}}$  为同方向列车连发间隔时间;  $\tau_{\text{到发}}$ 、 $\tau_{\text{发到}}$  分别为同方向列车不同时到发、发到间隔时间;  $\tau_{\text{会}}$  为会车间隔时间;  $\tau_{\text{不}}$  为不同时到达间隔时间。

(3) 机车接续唯一性约束。为确保接续流程正确, 分别约束列车选用机车车辆唯一性以及机车车辆接续唯一性。

$$\sum_{u(v)} x_{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i}^{u(v)} \leq 1; \forall k_{\gamma}^i, k_{\gamma+1}^i \in K_{\gamma}^n, u, v \in U \quad (11)$$

$$\sum_{u(v)} \sum_{i=1}^n x_{k_{\gamma}^i \rightarrow k_{\gamma+1}^i}^{u(v)} \leq 1; \forall k_{\gamma}^i, k_{\gamma+1}^i \in K_{\gamma}^n, u, v \in U \quad (12)$$

式中:  $u$ 、 $v$  分别为群组机车车辆与普通机车车辆;  $K_{\gamma}^n$ 、 $K_p$  分别为群组单元列车集合与普通列车集合。

(4) 交会规则约束。单线铁路中当相向列车即将交会时, 若一列车不停站通过, 另一列车则需要站在站内进行停车会让, 本文建立群组运行模式下单线重载铁路会让规则并依据规则进行会车, 规则流程如下:

**Step1:** 判断列车是否均为群组列车, 若均为群组列车, 则进入下一步, 否则非群组列车优先会让群组列车;

**Step2:** 判断列车是否均为重车或空车列车, 若均为重车或空车列车, 则进入下一步, 否则空车列车优先会让重车列车;

**Step3:** 判断群组规模大小是否相同, 若规模相同, 则进入下一步, 否则群组规模较小的列车优先会让群组规模较大的列车;

**Step4:** 根据车车通讯确定先行到达前方车站的列车停站进行会让, 待后到达的列车通过后, 再行发车通过。

根据本文模型假设, 确定本模型交会规则约束如下:

$$n \geq m \text{ 时, } \begin{cases} t_{arr}^{k_{\uparrow}^n, z_a} - t_{arr}^{k_{\downarrow}^m, z_a} - I_{q,m}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{不}}} \\ t_{set}^{k_{\downarrow}^m, z_a} - t_{set}^{k_{\uparrow}^n, z_a} - I_{q,n}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{会}}} \end{cases} \quad m, n \in N^+, \forall k_{\uparrow(下)}^{n(m)} \in K_{\uparrow(下)} \quad (13)$$

$$m > n = 1 \text{ 时, } \begin{cases} I_{q,1}^{\text{组内}} = 0 \\ t_{arr}^{k_{\downarrow}^m, z_a} - t_{arr}^{k_{\uparrow}^1, z_a} - I_{q,1}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{不}}} \\ t_{set}^{k_{\uparrow}^1, z_a} - t_{set}^{k_{\downarrow}^m, z_a} - I_{q,m}^{\text{组内}} \geq T_{\tau_{\text{会}}} \end{cases}$$

其中  $S_Z^q$  表示群组列车不可停车车站集合;  $S_Z^{\text{重}}$  表示重车列车不可停车车站集合;

(5) 天窗扣车约束。群组列车组群规模大于车站除正线外到发线可停靠单元列车的数量时, 禁止列车在接近天窗开始时间前的车站停车等待。

$$t_{arr}^{k_n, z_a} \lesssim T_{sta}^{clo} \text{ 且 } n > L_{z_a} \text{ 时, } \exists x_k^{z_a} = t_{stop}^{k_n, z_a} = 0; \forall k \in K, \forall z_a \in Z \quad (14)$$

式中:  $L_{z_a}$  为车站  $z_a$  除正线外到发线可停靠单元列车的数量;  $T_{sta}^{clo}$ 、 $T_{end}^{clo}$  分别表示天窗开始时间和天窗结束时间。

(6) 到发线数量约束。当群组列车的组群规模较大时, 其在某些到发线数量较小的车站将无法进行停车作业。

$$n \geq L_{z_a} + 1 \text{ 时, } \exists x_k^{z_a} = 0, t_{stop}^{k_n, z_a} = 0 \quad (15)$$

(7) 坡道起车约束。列车行驶至群组计划与行车计划规定的重车列车以及群组列车停车后起车较为困难的车站时, 禁止停车。

$$x_k^{z_a} = 0, t_{stop}^{k_n, z_a} = 0; z_a \in \{S_Z^{\text{重}} \cup S_Z^q\} \quad (16)$$

式中:  $S_Z^{\text{重}}$  为重车列车无法停站车站集合;  $S_Z^q$  为群组列车起车困难车站集合。

#### 4. 模型求解

由于单线重载铁路的运行图编制问题存在约束条件多、问题规模大、目标函数多、不确定性大等难点, 使得问题求解较为困难, 而多目标收敛粒子群算法在多目标优化、处理复杂约束条件、全局搜索能力等方面具有突出优势, 因此本文采用改进多目标粒子群算法进行求解。粒子的更新公式如下[10]:

速度更新:

$$V_i^{k+1} = \omega^k \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pBest_i^k - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gBest^k - X_i^k) \quad (17)$$

位置更新:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (18)$$

解矩阵结构如下:

$$\left. \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & n \\ p\_up & q\_do & p\_up & q\_do & \dots & type\_state \end{matrix} \right\} \text{列车编号、种类与状态}$$

$$\left. \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} t_{arr}^{k, z_1} \\ t_{arr}^{k, z_2} \\ t_{arr}^{k, z_3} \\ \vdots \\ t_{arr}^{k, z_a} \end{matrix} \right] & \left[ \begin{matrix} t_{arr}^{k, z_1} \\ t_{arr}^{k, z_2} \\ t_{arr}^{k, z_3} \\ \vdots \\ t_{arr}^{k, z_a} \end{matrix} \right] & \left[ \begin{matrix} t_{arr}^{k, z_1} \\ t_{arr}^{k, z_2} \\ t_{arr}^{k, z_3} \\ \vdots \\ t_{arr}^{k, z_a} \end{matrix} \right] & \left[ \begin{matrix} t_{arr}^{k, z_1} \\ t_{arr}^{k, z_2} \\ t_{arr}^{k, z_3} \\ \vdots \\ t_{arr}^{k, z_a} \end{matrix} \right] & \left[ \begin{matrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{matrix} \right] & \left[ \begin{matrix} t_{arr}^{k, z_1} \\ t_{arr}^{k, z_2} \\ t_{arr}^{k, z_3} \\ \vdots \\ t_{arr}^{k, z_a} \end{matrix} \right] \end{matrix} \right\} \text{列车到站时刻矩阵}$$

算法求解流程为:

Step1: 输入参数输入表中要求输入的各项条件参数, 包含组群规模、列车数量、车站数据、线路条件等;

Step2: 依序随机初始化各个列车车站发车时刻形成多个运行线方案, 这些方案即为多目标粒子群算法中的粒子, 确定迭代次数  $K_{max}$ 。

Step3: 计算每个粒子的目标函数值。

Step4: 比较目标函数值, 并依据 Pareto 支配原则将非支配解集存入 Pareto 解集档案中。

Step5: 采用动态密集距离排序的方法, 将距离相距较远的解留下, 淘汰距离较近的解, 以确保解的分布较为分散。留下的解用以更新 Pareto 解集档案。

Step6: 判断算法迭代次数是否满足输出条件, 如果满足则算法结束输出运行图铺画结果; 否则进入下一步。

Step7: 计算并确定个体最优(pbest)与群体最优(gbest)。

Step8: 进行 MOPSO 算法迭代, 首先更新惯性权重, 然后更新粒子的速度与位置, 最后进行改进的交叉变异操作, 完成后迭代返回 Step3。

## 5. 算例分析

### 5.1. 参数取值

本文选取神华重载铁路包神北线进行运行图铺画, 分析并结合包神北线运量目标、车站到发线长度、车站起停坡度等关键因素, 制定群组计划方案如下: 开行群组规模为 2, 组内总间隔时间为 3 分钟的群组列车 12 对; 普通列车 7 对; 限速 80 km/h, 停站时间不小于 5 min, 不大于 60 min; 天窗日天窗开启时分为 8:00A.M., 关闭时分为 12:00A.M.; 机车车辆最小接续时间为 30 min。

算法参数: 种群数量  $N = 30$ 、最大迭代次数  $K = 100$ 、惯性权重  $\omega^k = 0.7$ 、认知学习因子  $c_1 = 2$ 、社会学习因子  $c_2 = 2$ 。

### 5.2. 结果分析

迭代编图过程如图 2 所示, 大约经过迭代次数  $k = 40$  次迭代后, 目标函数已趋近于收敛, 在完成迭代次数  $K = 100$  次迭代后模型获得较优解, 运行图、机车周转图编图结果如图 3、图 4 所示, 验证了模型进行群组模式下单线铁路运行图编制的可行性。

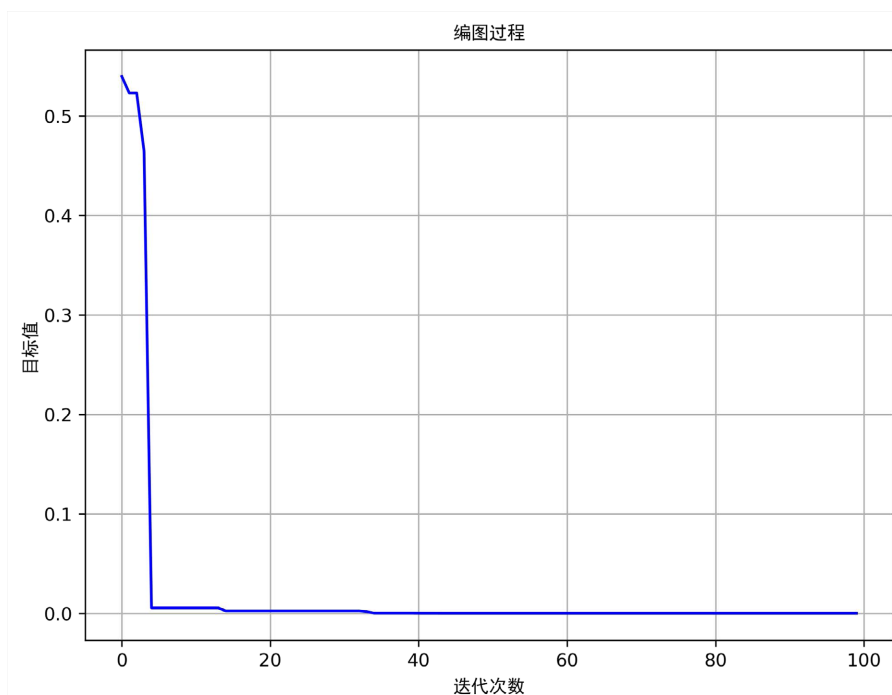


Figure 2. Algorithm iteration count and model mapping process

图 2. 算法迭代次数与模型编图过程



Figure 3. Diagram of train operations on the North Baotou-Shenmu Line in group mode  
图 3. 群组模式下包神北线重载列车运行图

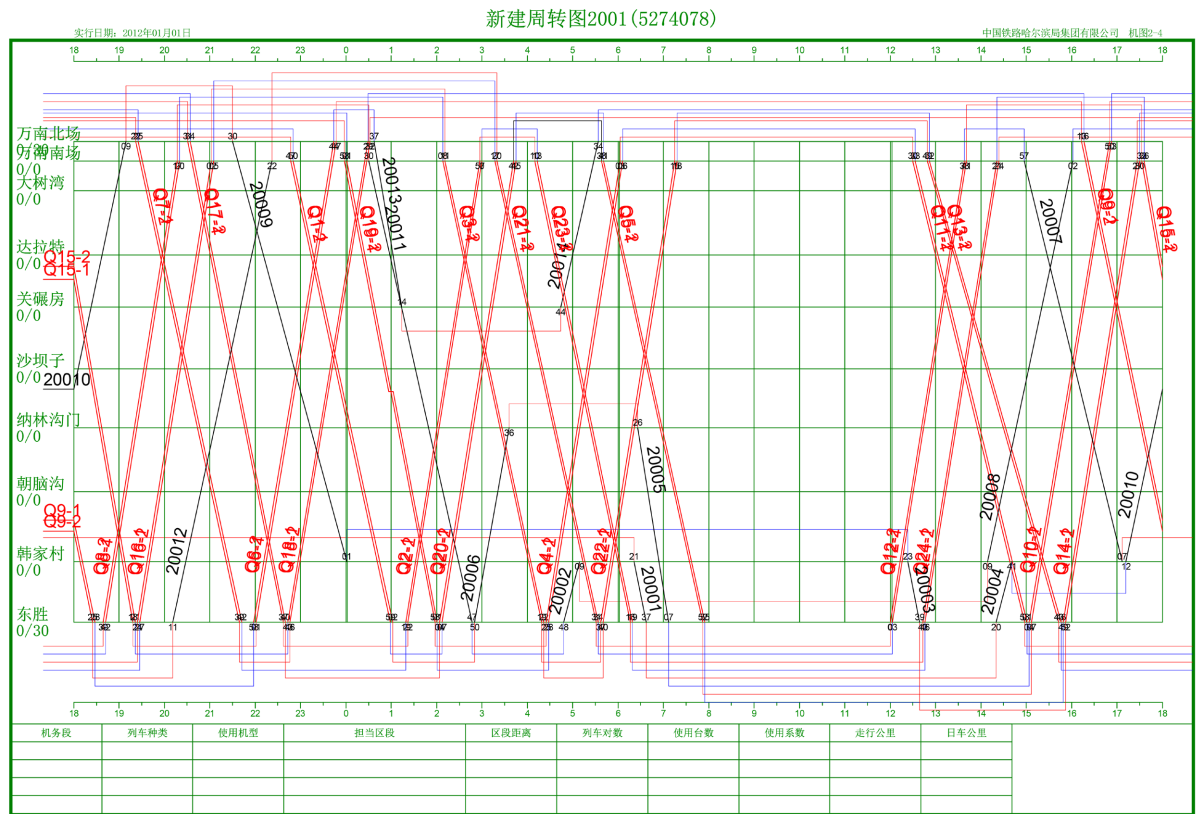


Figure 4. Diagram of locomotive turnaround on the North Baotou-Shenmu Line in group mode  
图 4. 群组模式下包神北线重载列车机车周转图



统计运行图与机车周转图指标, 结果如下(表 1 和表 2):

**Table 1.** Group tracking train operation data on the North Baotou-Shenmu Line

**表 1.** 包神北群组列车运行图数据表

列车种类	列车数	技术速度	旅行速度	总停站次数	平均停站次数	平均停时
普通列车	14	50.48	40.80	13	0.92	15"
群组列车	24	55.38	47.49	23	0.95	17"

**Table 2.** Locomotive turnaround chart data on the North Baotou-Shenmu Line with group tracking

**表 2.** 包神北线机车周转图数据表

使用台数	使用系数	走行公里	日车公里	全周转时间	中间站停时	技术速度	旅行速度	全周转次数
16	0.52	5129	321	6.4	4"84	54.66	13.36	31

运行图中列车到发均匀, 两种列车平均停站次数较少均不足 1 次, 平均停站时间较短, 机车周转时间 6.4 小时, 可见该模型铺画群组模式下重载列车运行图性能良好。

### 5.3. 分析对比

将模型所铺画的列车运行图与 2023 年国家能源集团列车运行图技术资料中的包神北线列车基本运行图进行对比分析。基本运行图中总计开行列车 21 对, 线路利用率已达 68.4%; 而模型所编制的群组列车运行图中, 开行群组列车 12 对, 普通列车 7 对, 共计 19 对, 线路利用率为 61.9%; 群组模式下线路中列车输送运量折合为普通列车可达 31 对, 相较于现有运输模式, 运量提升 47.6%, 线路利用率降低 6.5%, 可见群组运输模式, 不仅可极大降低行车密度, 还可提升线路货物运输能力。

## 6. 结论

本文主要针对单线重载铁路群组列车运行图铺画的问题, 从提高群组模式下运行图铺画的准确性与均衡性角度出发, 提出以运行“块”为要素的运行图铺画方法及模型。模型以列车总停站时间最少和机车的折返接续时间之和最小为铺画目标, 采用改进多目标粒子群算法求解, 并以“包神北线”重载铁路为算例进行验证与对比。该模型的计算结果在一定程度上证明了群组控制技术可极大降低现行重载铁路车站间隔时间。通过指标统计得到该模型有效且铺图结果均衡可靠, 在线路利用率普遍较高的单线重载铁路中施行群组模式可以有效降低行车密度并进一步提升线路运输能力。所建立模型可为后续群组运行模式在重载铁路中普遍施行后的运行图铺画工作提供一定参考, 为我国的铁路运输经济带来一定经济效益, 推进我国加快建设交通强国的伟大理想。

## 基金项目

重载列车群组运行控制系统技术研究与应用(GJNY-22-7/2300-K1220053)。

## 参考文献

- [1] 张辰东, 王文斌. 重载列车群组运行控制系统研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(7): 1-6.
- [2] 徐明龙, 李谷, 李蔚, 等. 重载组合列车纵向力劣化分析与运行安全研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 321-332.
- [3] 江峰, 倪少权. 大规模货物列车运行图优化编制的一种拉格朗日松弛启发式算法[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 21-31.

- 
- [4] 穆策, 孟令云, 廖正文, 等. 维修天窗与列车运行图一体化编制模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2155-2162.
- [5] 林柏梁, 王振宇, 倪少权, 等. 列车开行方案优化中的机车交路影响研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 1-11.
- [6] 高如虎, 牛惠民, 杨喜梅. 面向时变需求的高铁快运专列时刻表和配装方案综合优化研究[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(4): 122-131.
- [7] 倪少权, 陈吕张. 市场导向动态列车运行图协同编制理论及系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [8] 卓岑羽, 陈维亚, 宋宗莹, 等. 重载铁路混编群组列车开行方案编制模型与算法[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2024: 1-10. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240817>
- [9] 游婷, 马法运, 苗峰, 等. 城市轨道交通虚拟编组列车优化运行方案研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 36-42.
- [10] 叶倩琳, 王万良, 王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1107-1120, 1232.