文章编号：1003-1421(2025)12-0061-09
引用格式：袁博，李博，郭一唯，等.面向多目标优化的高速铁路车站股道运用方案快速生成方法研究[J].铁道运输与经济，2025，47(12)：61-69.
YUAN Bo，LI Bo，GUO Yiwei，et al. Rapid Generation Method of HSR Station Track Utilization Scheme for Multi-Objective Optimization[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：61-69.

面向多目标优化的高速铁路车站股道运用方案快速生成方法研究

袁　博[1]，李　博[2,3]，郭一唯[2,3]，张　新[2,3]

(1.中国铁道科学研究院 研究生部，北京　100081；2.中国铁路列车运行图技术中心，北京　100081；3.中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081)

摘　要：股道运用方案作为车站作业计划的核心内容，对于提高运输效率、保障服务水平、合理利用资源具有重要作用。为提升车站作业计划的自动化编制水平，研究可考虑多目标的高速铁路车站股道运用方案快速生成方法。区别于既有研究，将股道运用均衡性、鲁棒性等目标线性化描述，从而建立0-1整数线性规划模型，可借助商业软件快速精确求解。为验证方法优势，另采用模拟退火遗传算法求解模型，并对优化结果进行对比分析。以国内某高速铁路车站为研究对象，案例结果表明，在单目标或多目标组合下，方法均可在2 s内为281列车生成股道运用优化方案。相比模拟退火遗传算法，可在保证股道运用均衡性的前提下，显著提升求解效率，可为现场方案编制和辅助决策提供参考依据。

关键词：高速铁路；股道运用；多目标优化；CPLEX；模拟退火遗传算法
中图分类号：U238；U291　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250519004

Rapid Generation Method of HSR Station Track Utilization Scheme for Multi-Objective Optimization

YUAN Bo[1]，LI Bo[2,3]，GUO Yiwei[2,3]，ZHANG Xin[2,3]

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. China Railway Train Working Diagram Technology Center, Beijing 100081, China; 3. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: As the core element of the station operation plan, track utilization is of great significance for improving transportation efficiency, ensuring service levels and rationally utilizing resources. To enhance the automated compilation level of the station operation plan, a rapid generation method for high speed railway (HSR) track utilization scheme considering multiple objectives was studied in this paper. Different from previous studies, objectives such as the balance and robustness of track utilization were linearly described, and thus a 0-1 integer linear programming model was formulated, which could be rapidly and accurately solved by commercial solvers. To verify the advantages of the proposed method, a genetic algorithm with simulated annealing (GASA) was used

收稿日期：2025-05-19
通信作者：李博(1981—)，男，辽宁抚顺人，中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所研究员。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X002)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ263)

to solve the model, and a comparative analysis of optimization results was conducted. By taking an HSR station in China as an example, case studies show that under single or multiple objective scenarios, the proposed method can generate optimized track utilization schemes for 281 trains within 2 seconds. Compared with GASA, the proposed method can significantly enhance solution efficiency while ensuring the balance of track utilization, which is conducive to quickly providing a reference for on-site plan compilation and decision making.

Keywords: High Speed Railway; Track Utilization; Multi-Objective Optimization; CPLEX; Genetic Algorithm with Simulated Annealing

0　引言

车站股道运用方案是构成高速铁路列车运行图要素的核心内容之一，其合理编制对于提升旅客服务水平、高效利用车站设备具有重要意义。目前，高速铁路车站股道运用方案主要依赖于人工编制，即通常在运行图编制阶段，铺画完列车运行线后，编图人员考虑车站设备能力、安全间隔等约束，为每列车合理安排接发车股道。对于复杂繁忙的大型客运站，人工编制股道运用方案耗时费力，不利于对运行线铺画的合理性和可行性进行快速验证。因此，股道运用方案的自动优化和快速生成技术仍有待突破。

车站股道运用方案优化是一类有限资源下的分配优化问题，具有典型的NP-hard特征[1]。对于单目标优化研究，何林等[2]从旅客角度出发，以站内走行距离最短为目标，构建车站股道运用线性优化模型，并采用遗传算法求解。王保山等[3]以车站股道运用均衡性为目标建立非线性优化模型，并设计带有诱导变异的遗传算法求解，可在10 s内求解74列车的股道运用方案。王宇强等[4]研究了车站股道运用计划的自动编制方法，以列车对股道偏好度最大为目标，构建线性优化模型，并借助CPLEX求解，可在5 s内求解189对列车的股道运用方案。类似地，卢潇航[5]通过线性化建模，并借助CPLEX求解，可在10 s内求解西安北站全天股道运用方案。

多目标优化研究中，谢楚农等[6]考虑行车作业安全、方便旅客出行、均衡使用车站设备，构建股道运用优化模型，基于分层优化思想，针对前2个目标，利用分支定界法求解；而设备使用均衡性为非线性目标，采用定性分析结合定量计算方式求解。张苏波等[7]考虑股道占用费用和均衡性建立双目标非线性优化模型，并采用遗传算法求解。林志安等[8]以减少行车干扰、方便旅客出行、均衡运用股道为目标建立优化模型，设计带有捕食搜索策略的禁忌搜索算法求解。吕颖等[9]针对同时办理普速和高速作业的铁路客运站，考虑股道占用费用及均衡性，构建双目标优化模型，设计定性分析与定量计算结合的启发式求解流程。李涛等[10-11]以缩短旅客停留时间和提高股道运用均衡性为目标构建优化模型，采用模拟退火遗传算法求解。任禹谋等[12]提出基于分时段的股道运用多目标优化方法，高峰以股道运用均衡性最高和冲突最少为目标，平峰以股道占用费用最小和冲突最少为目标，分别构建双目标优化模型，设计带有约束准则的NSGA-Ⅱ算法求解。张毅等[13]考虑车站行调冲突，以股道运用均衡性最高、鲁棒性最强、行调干扰最小为目标，建立非线性整数规划模型，并设计改进遗传算法求解。

既有研究中无论是单目标还是多目标优化，在刻画股道运用均衡性时，普遍采用占用时间方差描述，而鲁棒性多采用缓冲时间方差[13]或“冲突系数”描述[14]，这都导致优化模型为非线性，虽然可通过智能启发式算法求解，但迭代计算过程对求解效率产生影响，不利于方案的快速生成或可行性验证。研究给定列车到发时刻下的股道运用方案快速生成方法，通过线性描述股道均衡性、鲁棒性等优化目标，建立0-1整数线性规划模型，从而借助商业软件实现多目标优化方案的快速求解，可为现场方案编制提供方案支持和决策依据。

1　数学模型

1.1　假设条件

（1）研究给定列车到发时刻下的车站股道运用优化问题，因此假设车站所有列车到发时刻已知且固定。

（2）由于车站不同进路走行距离差别不大[12]，因此假设相同作业采用不同进路接发车占用进路的

时间已知且相同。

（3）假设车站进路道岔采用一次性解锁方式。

（4）暂不考虑站内相关调车作业。

1.2　决策变量

借鉴指派问题和车间调度问题建模思路，优化模型决策变量用x_{ig}表示，含义为列车i是否占用股道g接发车，若占用取值为1，否则取值为0。

1.3　优化目标

（1）股道运用数量最少。即尽可能紧凑运用股道接发车，该目标主要用于确定车站最小场站规模[15]。

$$\min z_1 = \sum_{g \in G} y_g \tag{1}$$

式中：G为车站股道集合；y_g为辅助0–1变量，当股道g被任意列车占用时取值为1，否则取值为0。

（2）股道占用费用最小。主要体现车站股道对不同种类、行别、特殊需求等列车接发车作业的偏好，或者可理解为股道运用方案与固定使用方案的匹配程度，通常需事先给出列车占用股道的费用矩阵ω[16]。

$$\min z_2 = \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} \omega_{ig} \cdot x_{ig} \tag{2}$$

式中：ω_{ig}为列车i占用股道g的费用。

（3）股道占用时间均衡性最高。即从时间维度衡量股道运用的均衡性，常用股道占用时间的方差最小表示[17]。

$$\min z_3 = \frac{1}{m} \sum_{g \in G} (T_g - \overline{T_g})^2 \tag{3}$$

式中：m为车站股道总数；T_g和$\overline{T_g}$分别为股道g的占用时间和车站股道的平均占用时间，计算公式分别为

$$T_g = \sum_{i \in I} (t_{ig}^d - t_{ig}^a) \cdot x_{ig} \tag{4}$$

$$\overline{T_g} = \frac{1}{m} \sum_{g \in G} T_g \tag{5}$$

式中：I为车站接发列车集合；t_{ig}^a和t_{ig}^d分别为列车i占用股道g接车进路的起始时间和发车进路的终止时间，二者在给定列车到发时刻条件下，可通过与接发车作业时间线性计算得到。

（4）股道接发车数量均衡性最高。即从数量角度衡量股道运用的均衡性，可通过股道接发车数量的方差最小表示。

$$\min z_4 = \frac{1}{m} \sum_{g \in G} (N_g - \overline{N_g})^2 \tag{6}$$

式中：N_g和$\overline{N_g}$分别为股道g的接发车数量和车站股道的平均接发车数量，计算公式分别为

$$N_g = \sum_{i \in I} x_{ig} \tag{7}$$

$$\overline{N} = \frac{1}{m} \sum_{g \in G} N_g \tag{8}$$

（5）股道运用方案鲁棒性最高。是评价股道运用方案稳定性的重要指标[15]，在满足同股道最小发到安全间隔时间的基础上，通过在相邻接发车作业之间加入最小冗余时间，并以冗余时间小于最小冗余时间出现的次数最少来刻画方案鲁棒性。

$$\min z_5 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{g \in G} w_{ijg} \tag{9}$$

式中：w_{ijg}为辅助0–1变量，当列车i和列车j在股道g上接发车作业之间的冗余时间小于最小冗余时间时取值为1，否则取值为0。

将上述目标进行组合，得到可考虑多目标的股道运用优化目标函数。

$$\min z = \sum_{n=1}^{5} \mu_n \cdot z_n \tag{10}$$

式中：μ_n为目标z_n的权重，可根据现场方案编制需要和偏好灵活设置。针对多目标不同量纲情况，可采用功效系数法[16]解决。

1.4　约束条件

（1）股道占用约束。即为每列车安排一条股道，同时借鉴时间片[18]方法，对于任意时间片内的任意股道最多仅能被一列车占用。

$$\sum_{g \in G} x_{ig} = 1 \qquad i \in I \tag{11}$$

$$\sum_{i \in I_p} x_{ig} \leqslant 1 \qquad g \in G;\ \ p \in P \tag{12}$$

式中：I_p为时间片p内的列车集合；P为时间片集合。

(2)进路冲突约束。即保证不同接发车进路之间无作业冲突，且可用于判断列车运行图编制的合理性和可行性，采用尽量安排进路占用时间有重叠的列车采用平行进路作业形式刻画[19]。

$$(x_{ig} + x_{jh} - 1) \cdot \gamma_{ij} \leqslant \rho_{gh} \qquad i,\ j \in I;\ \ g,\ h \in G \tag{13}$$

式中：γ_{ij}为辅助0–1变量，当列车i和列车j接发车作业占用进路的时间重叠时取值为1，否则取值为0，在给定列车到发时刻条件下，其值已知且固定；ρ_{gh}为辅助0–1变量，当股道g和股道h存在平行进路时取值为1，否则取值为0，在给定车站平面结

构条件下，其值已知且固定。

（3）接续列车股道占用约束。对于有接续关系的列车，如出段始发列车、终到入段列车、折返列车等，需安排相同股道接发车。

$$\sum_{g\in G} x_{ig}\cdot x_{i'g}\geqslant o_{i,\,i'} \qquad i,\ i'\in I \tag{14}$$

式中：$o_{i,\,i'}$为辅助0–1变量，当列车i和i'存在接续关系时取值为1，否则取值为0。

（4）通过列车股道占用约束。对于通过列车，仅采用正线股道接发车。

$$\sum_{g\in G_t} x_{ig}=1 \qquad i\in I_t \tag{15}$$

式中：G_t为正线股道集合；I_t为通过列车集合。

（5）特殊列车股道占用约束。对于有吸污上水、快货业务等特殊需求的列车，需安排特定股道接发车。

$$\sum_{g\in G_s} x_{ig}=1 \qquad i\in I_s \tag{16}$$

式中：G_s为具备接发特殊需求列车的股道集合；I_s为特殊列车集合。

（6）变量约束。对辅助0–1变量的取值进行约束。

$$\begin{cases} x_{ig}\leqslant y_g \\ s_{ijg}=x_{ig}\cdot x_{jg} \\ -v_{ijg}\cdot M\leqslant (t^a_{jg}-t^d_{ig}-T_{\min})\cdot s_{ijg}\leqslant (1-v_{ijg})\cdot M-\varepsilon \\ w_{ijg}=s_{ijg}\cdot v_{ijg} \end{cases}$$
$$i,\ j\in I;\quad g\in G \tag{17}$$

式中：s_{ijg}为辅助0–1变量，当列车i和列车j都在股道g上接发车时取值为1，否则取值为0；v_{ijg}为辅助0–1变量，当列车i早于列车j到达股道g，且两车接发车作业之间的冗余时间小于最小冗余时间时取值为1，否则取值为0；$T_{\min}$为相同股道接发车作业之间的最小冗余时间；M为充分大的正数；ε为充分小的正数。

2　模型求解

2.1　模拟退火遗传算法

前文构建的数学模型具有非线性形式，选择带有模拟退火机制的遗传算法(GASA)进行求解，其已被成功应用于股道运用方案优化研究中[10–11]。遗传算法(GA)最早由Holland[20]提出，算法模拟自然界生物进化过程，通过选择、交叉、变异等操作实现随机搜索，得到最优或近似最优解。模拟退火(SA)思想在20世纪50年代被提出，后来被成功应用于组合优化领域[21]。其通过模拟物理退火特性，以一定概率接受劣质解，从而可避免遗传算法搜索陷入局部最优。劣质解接受概率基于Metropolis准则，计算公式为

$$P=\begin{cases} 1 & f\geqslant f_k \\ \mathrm{e}^{\frac{f-f_k}{T_k}} & \text{其他} \end{cases} \tag{18}$$

$$T_k=T_0\cdot\alpha^k \tag{19}$$

式中：f为历史最优目标值；f_k为第k次迭代最优目标值；T_k为第k次迭代的温度；T_0为初始温度；α为温度下降速率。

GASA算法流程如图1所示，具体步骤如下。

步骤1：算法初始化。输入参数，包括：最大迭代次数、种群规模、交叉概率、变异概率、模拟退火初始温度、温度下降速率、迭代提前终止条件。

步骤2：采用实数编码方式(即每列车占用的股道编号)，随机产生初始种群，染色体长度即为接发车总数，并加入原始方案个体。计算个体适应度(即目标函数)，记录最优个体和最优目标值。

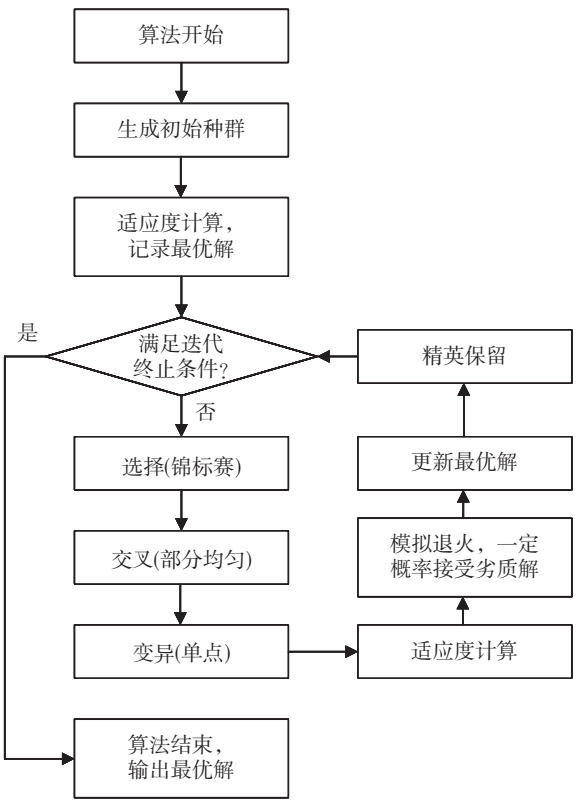

图1　GASA算法流程

Fig.1　GASA solution process

步骤3：执行迭代。如果达到最大迭代次数或满足提前终止条件，转步骤8；否则，转步骤4。

步骤4：选择操作。为保证种群多样性，采用锦标赛策略，即随机选择种群中两个体，从中选择适应度更高的作为父代个体。转步骤5。

步骤5：交叉操作。采用部分均匀交叉策略，即为每对父代染色体随机选择相同位置的基因片段，对于片段中每个基因，生成0~1间的随机数，如果大于交叉概率，不进行操作，否则将两染色体该基因互换，若该基因对应列车存在接续关系，则为接续列车对应基因赋予相同的股道编号。转步骤6。

步骤6：变异操作。采用单点变异策略，即为每条染色体从非通过列车和不具有特殊作业列车对应的基因中随机选择一个，生成0~1间的随机数，如果大于变异概率，不进行操作，否则为该基因赋予新的股道编号，若该基因对应列车存在接续关系，则为接续列车对应基因赋予相同的股道编号。转步骤7。

步骤7：更新最优解。计算子代个体适应度，加入模拟退火机制，一定概率接受较差个体进入下次迭代，接受概率通过公式(18)—(19)得到。更新最优个体和最优目标值，并加入精英保留策略，即用最优个体替换最劣个体。转步骤3。

步骤8：算法结束。输出最优个体和最优目标值。

2.2　模型线性化处理

鉴于智能启发式算法存在难以求得最优解、迭代计算导致求解效率下降的不足，考虑对模型进行线性化处理，从而借助商业软件快速精确求解，达到方案快速生成的目的。分析模型发现，公式(3)中股道占用时间均衡性以方差形式刻画，虽然可以更好地描述数据离散程度，但目标函数带有非线性2次项，难以借助商业软件快速求解。对此，考虑以绝对值形式刻画均衡性指标，即用股道占用时间与平均占用时间差值的绝对值求和表示，计算公式为

$$\min z_3' = \sum_{g \in G} \left| T_g - \overline{T_g} \right| \tag{20}$$

对于上述目标函数，可引入2个m维辅助变量u^1和u^2对其进行线性化处理，转化为

$$\begin{cases} \min z_3' = \sum (u_g^1 + u_g^2) \\ T_g - \overline{T_g} = u_g^1 - u_g^2 \\ u_g^1,\ u_g^2 \geqslant 0 \end{cases} \qquad g \in G \tag{21}$$

同理，公式(6)中股道接发车数量均衡性也可通过绝对值求和形式体现，采用上述相同方式处理，转化为

$$\begin{cases} \min z_4' = \sum (u_g^3 + u_g^4) \\ N_g - \overline{N_g} = u_g^3 - u_g^4 \\ u_g^3,\ u_g^4 \geqslant 0 \end{cases} \qquad g \in G \tag{22}$$

另外，公式(14)中$o_{ii'}$及公式(17)中s_{ijg}和w_{ijg}的表示均存在决策变量相乘的非线性形式，对其分别进行线性化处理，转化为

$$\begin{cases} o_{ii'} \geqslant x_{ig} + x_{i'g} - 1 \\ o_{ii'} \leqslant x_{ig},\ o_{ii'} \leqslant x_{i'g} \end{cases} \qquad i,\ i' \in I;\ \ g \in G \tag{23}$$

$$\begin{cases} s_{ijg} \geqslant x_{ig} + x_{jg} - 1 \\ s_{ijg} \leqslant x_{ig},\ s_{ijg} \leqslant x_{jg} \end{cases} \qquad i,\ j \in I;\ \ g \in G \tag{24}$$

$$\begin{cases} w_{ijg} \geqslant s_{ijg} + v_{ijg} - 1 \\ w_{ijg} \leqslant s_{ijg},\ w_{ijg} \leqslant v_{ijg} \end{cases} \qquad i,\ j \in I;\ \ g \in G \tag{25}$$

因此，原数学模型转化为0–1整数线性规划模型，可借助商业软件进行求解。但是，以方差和绝对值求和2种形式刻画股道运用均衡性的结果有所不同，为了分析其差异性，将在案例部分对商业软件与GASA求解结果进行对比。

3　案例分析

3.1　基础数据

以国内某高铁站为案例研究对象，高铁站站场示意图如图2所示，不同作业进路共92条。其中，

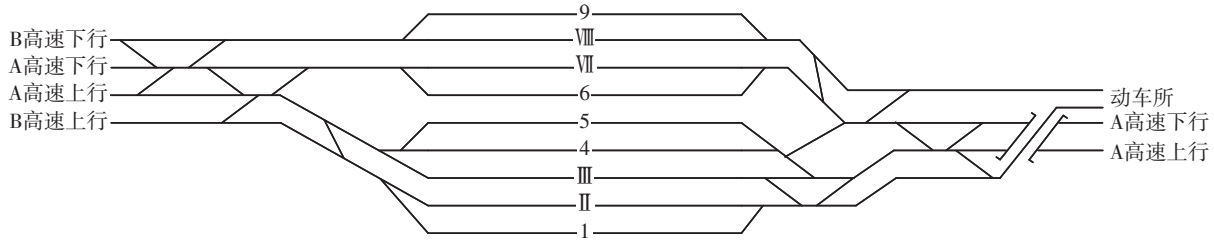

图2　高铁站站场示意图

Fig.2　HSR station yard

Ⅱ道为上行正线，只接发通过列车，Ⅷ道为下行正线。选取2024年某季度日常运行图，全日接发车共281列，列车作业类型如表1所示。列车占用进路时间为始发、终到、通过取3 min，出入段取4 min。相同股道接发车作业之间的最小冗余时间$T_{\min}$取5 min。股道占用费用ω_{ig}根据列车种类、行别、作业类型等从［1，3，5，20］中选取，受篇幅限制，不具体给出。

表1　列车作业类型　　列
Tab.1　Train operation types

作业类型	数量	作业类型	数量
始发(含入段)	43	停站	153
终到(含出段)	43	通过	42
入段	18	立折	9
出段	16	上水、吸污、快货	3，2，2

优化计算过程在2.8 GHz处理器、16 GB内存的个人计算机中完成，商业求解软件采用CPLEX 12.9，GASA算法参数设置如表2所示，提前终止条件设置为连续30次迭代最优目标值不变。

表2　GASA算法参数设置
Tab.2　GASA parameter settings

参数	取值	参数	取值
迭代次数	500	变异概率	0.2
种群数量	40	退火初温	100
交叉概率	0.8	降温速率	0.98

3.2　优化结果

3.1.1　单目标优化结果

采用GASA对目标1~5分别求解。其中，目标3和4分别以非线性形式的z_3和z_4为目标函数。由于算法具有随机性，选取多次求解最优结果，GASA求解指标对比如表3所示。对于z_1，算法没有搜索出更优方案，迭代过程提前终止；对于z_2，股道占用费用下降11.1%；对于z_3，优化率达46.7%，对应方案使z_3'优化率达41.8%；对于z_4，优化率达88.7%，对应方案使z_4'优化率达75.1%；对于z_5，优化率为78.3%。GASA迭代收敛过程如图3所示，由于加入模拟退火机制，允许一定概率接受劣质解，因此迭代过程中出现最优目标值上下浮动情况。

表3　GASA求解指标对比
Tab.3　Comparison of indicators with GASA

目标函数	z_1	z_2	z_3/z_3'	z_4/z_4'	z_5
原始方案	9	395	16 359.6/965.3	95.3/73.8	46
优化方案	9	351	8 718.2/561.4	10.8/18.4	10
优化率/%	0	11.1	46.7/41.8	88.7/75.1	78.3
迭代次数	30	187	129	137	163
求解时间/s	5.6	32.5	25.3	28.5	34.2

注：原始方案为人工编制方案；z_3/z_3'和z_4/z_4'中前者为模型求解的优化目标，后者为优化方案对应的计算结果。

为体现提出方法的优势，采用CPLEX对不同目标进行优化求解，CPLEX求解指标对比如表4所示。其中，目标3和4分别以线性形式的z_3'和z_4'为目标函数。可以看出，对于z_1，优化方案较原始方案和GASA方案可减少运用1条股道；对于z_2，股道占用费用下降19.2%，优化效果优于GASA；对于z_3'，优化率为46.1%，对应方案使z_3优化率达39.9%；对于目标z_4'，优化率达75.1%，对应方案使z_4优化率达87.9%，均与GASA求得结果相近；对于z_5，优化率达91.3%，方案鲁棒性提升效果较为显著，且优于GASA。另外，对于不同优化目标，CPLEX均可在2 s内得到最优方案，具有较高的求解效率。

整体来看，GASA为启发式非精确算法，虽然可求解非线性目标z_3和z_4，但迭代计算导致求解效率显著降低。而将目标线性化处理后，可借助CPLEX快速精确求解，虽然z_3优化率较GASA下降6.8(46.7−39.9)个百分点，但求解时间大幅缩减，仅为GASA的1/17。因此，若考虑以股道运用均衡性为目标，方法可在保证较优均衡性的前提下，显著提升求解效率，为现场方案编制提供快速且精确的参考依据。

3.1.2　多目标优化结果

以股道占用费用z_2最小、占用时间均衡性z_3'最高、方案鲁棒性z_5最高组合为例，进行多目标优化方案求解。结合目标值量级，给出相应权重，以μ_1和μ_4取0，μ_2，μ_3和μ_4分别取5，1和20为例，求解指标对比如表5所示。

结果显示，相比原始方案，采用CPLEX求解，目标值优化率达39.0%，明显高于GASA的23.9%，且求解时间仍保持在2 s内。可见，CPLEX在优化效果和求解效率方面均显著优于GASA，验证了方法求解多目标优化方案的可行性和优势。值得注意的是，在本案例参数设置下，CPLEX优化方案中z_3'和z_5指标与表4中对应单目标优化的目标值相同，从侧面说明该方案为两目标下的帕累托(Pareto)最优

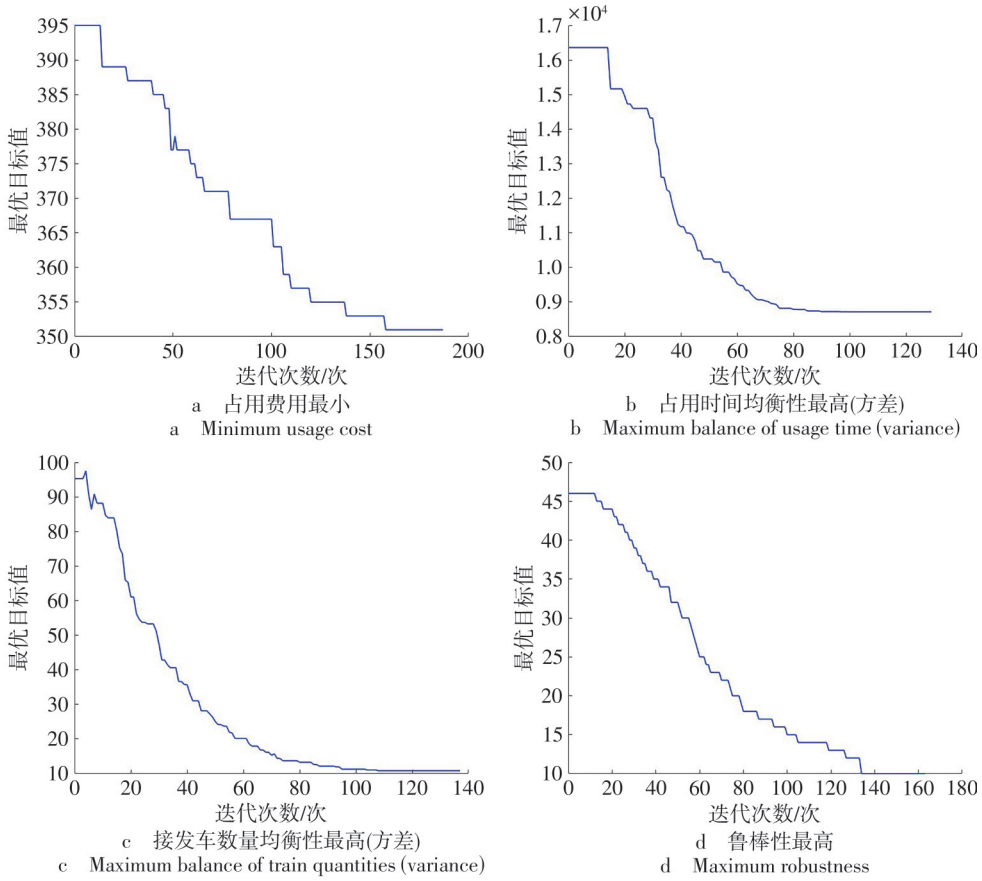

图3　GASA迭代收敛过程

Fig.3　Iterative convergence process of GASA

表4　CPLEX求解指标对比

Tab.4　Comparison of indicators with CPLEX

目标函数	z_1	z_2	z_3'/z_3	z_4'/z_4	z_5
原始方案	9	395	965.3/16 359.6	73.8/95.3	46
优化方案	8	319	520.4/9 831.2	18.4/11.5	4
优化率/%	11.1	19.2	46.1/39.9	75.1/87.9	91.3
求解时间/s	1.49	1.51	1.53	1.60	1.64

注：z_3'/z_3和z_4'/z_4中前者为模型求解的优化目标，后者为优化方案对应的计算结果。

表5　求解指标对比

Tab.5　Comparison of indicators

指标	原始方案	GASA	CPLEX
z_2	395	385	351
z_3'	965.3	673.4	520.4
z_5	46	17	4
z	3 860.3	2 938.4	2 355.4
优化率/%	—	23.9	39.0
迭代次数	—	201	—
求解时间/s	—	59.1	1.82

解，且均衡性和鲁棒性2个目标不存在冲突，即不论权重如何取值，该方案均可达到最优。

优化前后车站股道运用方案对比如图4所示，优化前后车站股道运用情况对比如图5所示。可以看出相比原始方案，相同股道接发车作业之间的冗余时间明显增大，方案鲁棒性得到提升。从占用情况来看，股道4和5得到了充分利用，有效分担了股道1，3和9的作业压力，使车站股道运用整体均衡性提升。

4　结束语

研究可考虑多目标的高速铁路车站股道运用方案快速生成方法，将均衡性、鲁棒性等优化目标线性描述并组合，从而可借助商业软件快速精确求解。与智能启发式算法优化结果进行对比，验证了提出方法的优势。以国内某高速铁路车站为研究对象开展案例分析，结果表明方法可在短时间内快速生成股道运用优化方案，可较好辅助车站作业计划编制或运行图可行性验证等工作。研究主要以安排平行进路形式刻画进路冲突约束[19]，但该方式并没

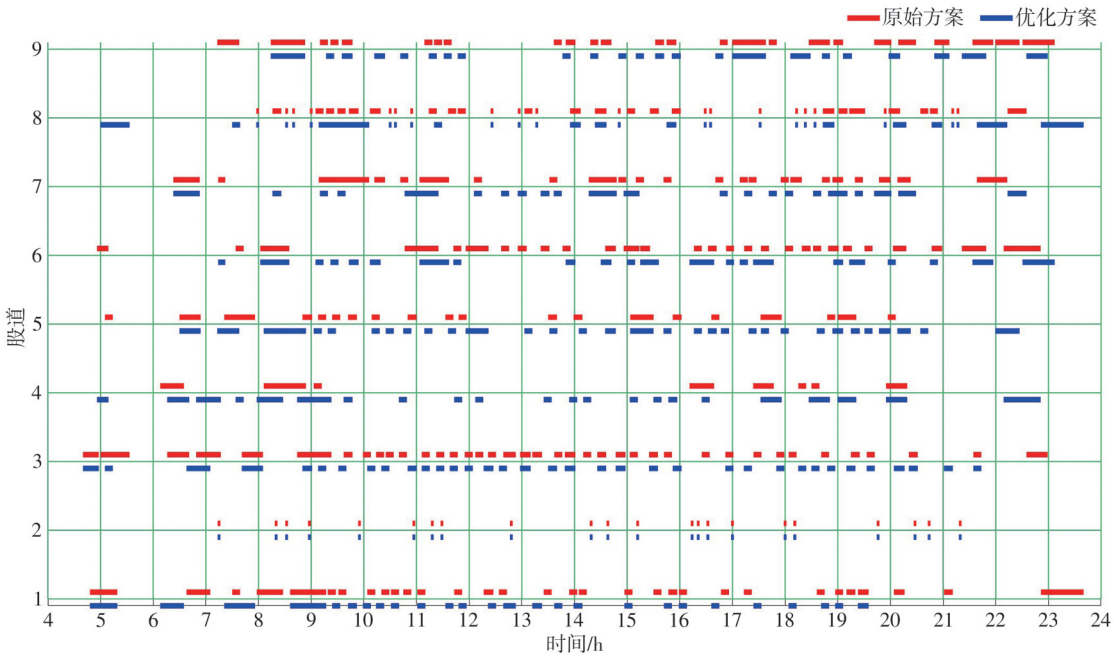

图4　优化前后车站股道运用方案对比

Fig.4　Comparison of station track utilization plan before and after optimization

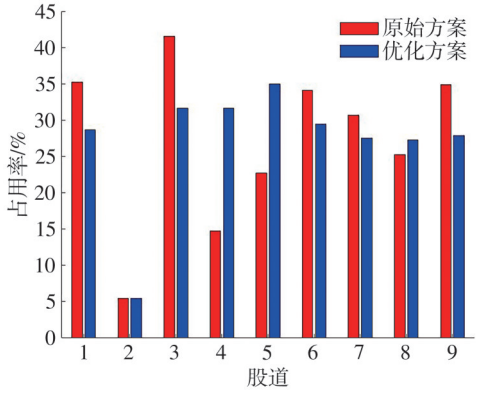

图5　优化前后车站股道运用情况对比

Fig.5　Comparison of station track utilization before and after optimization

有实现进路的具体分配，仍存在冲突的可能性。对此，未来将开展车站咽喉区进路和股道运用方案的一体化快速优化方法研究，并加入对调车作业的考虑，进一步提升车站作业计划的自动化编制水平。

参考文献：

[1] GAREY M R，JOHNSON D S. Computers and Intractability：A Guide to the Theory of NP-Completeness[M]. San Francisco；New York：W. H. Freeman，1979.

[2] 何　林，吕红霞. 高速铁路车站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2012，34(8)：47-50，66.
HE Lin，LYU Hongxia. Research on Optimization of Arrival-Departure Track Using in High Speed Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2012，34(8)：47-50，66.

[3] 王保山，侯立新，刘海东. 客运专线车站到发线运用优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息，2012，12(2)：105-110.
WANG Baoshan，HOU Lixin，LIU Haidong. Optimized Utilization of Arrival and Departure Tracks in Dedicated Passenger Lines[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2012，12(2)：105-110.

[4] 王宇强，田方晓，申宏楠，等. 高速铁路大型客运站列车股道运用计划自动编制方法研究[J]. 综合运输，2024，46(11)：68-74.
WANG Yuqiang，TIAN Fangxiao，SHEN Hongnan，et al. Station Track Utilization for Large Passenger Station on High Speed Railway[J]. China Transportation Review，2024，46(11)：68-74.

[5] 卢潇航. 高速铁路车站股道运用方案自动编制方法研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2024.

[6] 谢楚农，黎新华. 铁路客运站到发线运用优化研究[J]. 中国铁道科学，2004，25(5)：130-133.
XIE Chunong，LI Xinhua. Optimization Research for Utilization of Arrival and Departure Tracks in Railroad Passenger Station[J]. China Railway Science，2004，25(5)：130-133.

[7] 张苏波，廖　勇，邹健康，等. 基于遗传算法的客运站到发线优化安排[J]. 铁道运输与经济，2007，29(11)：24-27.
ZHANG Subo，LIAO Yong，ZOU Jiankang，et al. Optimize the Occupation Plan of Arrival-Departure Lines in Passenger Station Based on Genetic Algorithm[J]. Railway Transport and

Economy，2007，29(11)：24-27.

[8] 林志安，潘玲巧．铁路客运站到发线分配问题研究[J]. 铁道运输与经济，2010，32(10)：58-61.
LIN Zhian，PAN Lingqiao. Study on Allocation of Receiving & Departure Lines in Passenger Stations[J]. Railway Transport and Economy，2010，32(10)：58-61.

[9] 吕　颖，马　驷，王　琳．关于高速铁路车站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2014，36(8)：26-31.
LYU Ying，MA Si，WANG Lin. Study on Optimization of Arrival-Departure Line Using in High Speed Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(8)：26-31.

[10] 李　涛，韩建鹏．铁路客运站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2020，42(2)：81-86.
LI Tao，HAN Jianpeng. A Study on the Optimization of the Operation of Arrival and Departure Tracks in Railway Passenger Station[J]. Railway Transport and Economy，2020，42(2)：81-86.

[11] 李　涛，张杉基，孙建林，等．基于改进遗传算法的客运站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2020，42(6)：30-37.
LI Tao，ZHANG Shanji，SUN Jianlin，et al. A Research on Optimization of Passenger Station Arrival & Departure Tracks Utilization Based on IGA[J]. Railway Transport and Economy，2020，42(6)：30-37.

[12] 任禹谋．高速铁路大型客运站到发线分配优化策略及方法研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2021.

[13] 张　毅，李季涛，孙婉婷，等．考虑行调冲突的大型高铁站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：111-121.
ZHANG Yi，LI Jitao，SUN Wanting，et al. Optimization of Departure and Arrival Track Utilization in Large High Speed Railway Stations Considering Conflicts between Train Movement and Shunting Activities[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：111-121.

[14] 郭　彬．高铁大型客运站技术作业综合优化模型、算法与系统研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.

[15] 王保山．客运专线车站作业计划优化编制方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[16] 甘志良．高速铁路车站咽喉区与到发线综合运用优化[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[17] 江　秀，倪少权，陈钉均．客运站到发线运用优化研究综述[J]. 铁道运输与经济，2014，36(11)：14-18.
JIANG Xiu，NI Shaoquan，CHEN Dingjun. Study on Utilization Optimization of Arrival-Departure Track in Passenger Station[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(11)：14-18.

[18] 吕红霞，倪少权，纪洪业．技术站调度决策支持系统的研究：到发线的合理使用[J]. 西南交通大学学报，2000，35(3)：255-258.
LYU Hongxia，NI Shaoquan，JI Hongye. The Study on DSS of the Technical Station Dispatching：Rationally Utilizing Reception and Departure Siding[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2000，35(3)：255-258.

[19] 江　秀，刘　茜．客运站到发线运用优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2015，13(2)：74-79.
JIANG Xiu，LIU Xi. Research on Optimization of Arrival-Departure Lines in Passenger Station[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2015，13(2)：74-79.

[20] HOLLAND J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems[M]. The University of Michigan Press，1975.

[21] KIRKPATRICK S，GELATT C D J，VECCHI M P. Optimization by Simulated Annealing[J]. Science，1983，220(4598)：671-680.

(责任编辑　吴文娟)

(上接第47页)

组织方案[J]. 铁道货运，2015，33(11)：1-6，66.
DING Yongmin，MA Zhiqiang，ZHANG Jun，et al. Program of Rescue Organization for 30 000 Tons Heavy-Haul Train on Datong-Qinhuangdao Line[J]. Railway Freight Transport，2015，33(11)：1-6，66.

[17] CHENG F L，TANG T，SU S，et al. Optimization on the Dynamic Train Coupling Process in High Speed Railway[J]. Chinese Journal of Electronics，2023，32(5)：1002-1010.

[18] ZHAO X D，TANG T，WANG D，et al. Distributed Fixed-Time Formation Control for Heavy Haul Trains Based on Sliding Mode Control[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2024，633：129428.

[19] SU S，SHE J F，LI K C，et al. A Nonlinear Safety Equilibrium Spacing-Based Model Predictive Control for Virtually Coupled Train Set over Gradient Terrains[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2022，8(2)：2810-2824.

[20] WANG Y H，DE SCHUTTER B，VAN DEN BOOM T J J，et al. Optimal Trajectory Planning for Trains：A Pseudospectral Method and a Mixed Integer Linear Programming Approach[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2013，29：97-114.

(责任编辑　魏　然)