

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0231-12

引用格式: 陈哲轩, 陈绍宽, 刘爽, 等. 考虑日常灵活检修的城市轨道交通车底运用计划优化方法[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 231-242.

Citation: Chen Zhexuan, Chen Shaokuan, Liu Shuang, et al. Optimization method for rolling stock operation scheduling plan in urban rail transit system considering daily flexible maintenance[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 231-242.

考虑日常灵活检修的城市轨道交通车底运用计划优化方法

陈哲轩¹, 陈绍宽^{1,2}, 刘 爽^{1,2}, 柏 赞^{1,2}, 高 琛¹

(1. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学 中国综合交通研究中心, 北京 100044)

摘 要: 为缓解城市轨道交通车底日常检修和持续上线之间的矛盾, 提出融合双周检与三月检分时、分地执行灵活检修策略的多级修程车底运用计划优化方法。以优化运用车数量和车底运行里程极差为目标, 构建考虑任务执行、任务间时空接续和车底检修状态更新等约束的优化模型。针对经典启发式算法搜索效率低、易陷入局部最优等问题, 设计融合大邻域搜索策略的自适应混合蚁群优化 (AHACO) 算法实现模型求解, 并基于某城市已运营的轨道交通线路开展案例研究。结果表明: 相较于传统检修策略, 采用灵活检修策略的优化方法可减少运用车 2 列, 降低车底运行里程极差 432 km, 并延长车底平均上线时间 0.78 d; 在不同检修能力条件下, 当车辆段的双周检和三月检能力均略高于停车场时, 可兼顾车辆段和停车场内的车底检修需求, 并获得运用车数最少、运行里程极差最小的最优方案。该方法可节省车底购置与检修成本, 并进一步提高车底运用效率和运用均衡性。

关键词: 城市轨道交通; 车底运用计划; 灵活检修策略; 日常检修修程; 自适应混合蚁群优化算法

中图分类号: U279.2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.18

随着城市轨道交通线网运营规模的持续扩大和列车运行服务水平的不断提升, 列车高强度运用与频繁检修间的冲突逐步加剧^[1], 传统计划性修程规定的长时间扣修作业缺乏灵活性, 限制了列车的运用效率。为缓解列车运检冲突、降低列车购置与检修成本, 亟须开展灵活检修策略下的车底运用计划优化研究。

列车跳停^[2]、复杂编组^[3]、复杂交路^[4]及跨线运营^[5]等复杂运营组织模式均会影响车底的上线运行安排。相关研究多聚焦于单日计划期内的车底周转和时刻表协同优化^[6], 通常不考虑车底检修作业安排问题, 且优先关注乘客服务质量^[7]、企业运营成本^[8]等目标。例如, Wang 等^[9]考虑列车灵活编组模式和车站容量约束, 优化站台滞留

乘客数量、车辆固定成本和运营成本; 李茜等^[10]提出带调整机制的深度强化学习算法, 通过优化列车运行控制策略降低牵引能耗。

列车检修与运用作业具有高度耦合的特性^[11], 有必要对二者进行协同优化。既有基于检修任务的车底运用计划优化研究通常以单日交路计划为输入条件^[12], 将预防性修程作为核心约束^[13], 通过耦合车底运用状态与检修需求, 优化检修能力匹配度与任务接续过程。此类研究多围绕高铁动车组展开, 重点关注检修成本优化^[14]与动车所分布决策^[15]等问题。例如, Folco 等^[16]在有限运用车数量和检修资源容量的约束下, 研究列车纠正性维修和预防性维修成本的最小化问题; Canca 等^[17]基于遗传算法优化动车组运用计划, 以确定动车所的

收稿日期: 2025-07-11; 修订日期: 2026-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2569203)

第一作者: 陈哲轩 (1999—), 男, 福建武夷山人, 博士研究生。E-mail: 22110261@bjtu.edu.cn

通讯作者: 刘 爽 (1980—), 女, 北京人, 副教授, 博士。E-mail: liushuang@bjtu.edu.cn

数量及分布位置并最小化列车空驶里程。

与高铁动车组相比,城市轨道交通系统呈现出客流密度大、发车间隔短的运营特征,导致城轨车底在线路运营时段内面临着更高的周转强度与持续上线压力。然而,为保证城轨系统运营安全可靠,车底需占用运营时段执行频繁的日常检修作业,部分车底长时间扣停检修进一步加剧了运用车的紧张程度。因此,针对有限车底资源和高频检修模式对列车运用强度的制约,城轨车底运用计划研究通常更侧重于车底运用成本^[18]、运用效率^[19]和运用均衡性^[20]等指标的优化。例如,冯佳等^[21]研究了地铁双周检修程和车辆基地共享条件下的车底运用计划编制方法,优化结果可减少运用车数量和车底接续成本;姜建萍等^[22]采用最优-最差蚁群算法求解考虑双周检修程的运用计划优化模型,可使车底运用更加高效;徐鹏等^[23]结合列车走行里程要求,提出双车辆段条件下的地铁列车运用计划优化方法,在保证运用均衡性的前提下实现检修日期的自动生成和调整。

综合既有研究成果可知,学者们大多关注单一类型修程(如双周检)集中检修模式下的车底运用问题,考虑日常多级修程灵活检修的城市轨道交通车底运用计划优化研究相对较少,针对列车因长时间扣修导致的运用效率下降、运用均衡性不足等问题亟待深入探讨。其核心难点在于列车多级检修要求与持续上线需求之间相互牵制,交路段任务的统筹安排受列车扣修作业的干扰,难以保证各列车运用和检修的相对均衡。针对上述问题,本文提出1种允许多级修程检修作业分散执行、协同车底运用数量与运用均衡性的多日运用计划优化方法,并设计带自适应大邻域搜索算子的混合蚁群优化算法,以解决同时受车底上线运行和回场检修限制的大规模组合优化难题。

1 问题描述

以最常见的一段一场式城市轨道交通线路为研究对象,在已知线路每日交路段任务和多级修程检修规定的前提下,协调一定时间内各车底上线运行和扣停检修的决策过程,以实现运用车数量和车底运行里程极差的双目标最小化。其中,前者旨在节省车辆购置费用和检修费用,并提高车底运用效率;后者旨在提升车底运用均衡性,并避免因不同

车底运行里程差异过大导致的检修计划安排不均衡现象。

编制多日运用计划的前提是明确每日开行计划,参考动车组单日交路计划编制方法^[12],将线路每日运行图解构为若干个运用交路段,并将其定义为车底离开车场(车辆段/停车场)到返回车场期间连续执行的车次序列(一些地铁公司也称其为“表号”)。每个交路段均包含执行日期、始发与终到车场、始发与终到时间等基本信息。具体划分步骤如下。

步骤1:读取线路每日运行图,明确线路运营起止时间及各车次到发车站和到发时间。

步骤2:遵循接续时间最短原则拼接相邻车次形成车次链,其中前续车次的结束时刻与列车折返时间之和不得晚于后续车次的开始时刻,且前续车次的终到车站与后续车次的始发车站需相同。

步骤3:对于无前向接续或后向接续的车次链,按照就近接续原则分别将车次链的始发车站或终到车站与相邻的车场衔接。

步骤4:将所有车次链按照开始时刻升序排列,得到每日交路段任务集合,其中开始时刻为某车次链始发时刻扣除停站时间,结束时刻为某车次链终到时刻增加停站时间,2类时刻均处于线路运营时段内。

划分过程示意图如图1所示。图中以交路段1为例:车场1和车场2分别为始发车场和终到车场; t_1^{dep} 和 t_1^{arr} 分别为开始时刻和结束时刻;执行日期为第 p 日。

在此基础上,将给定交路段任务合理分配给各车底,并更新各车底的累计运行状态,当车底到达某个修程周期后为其安排对应等级的检修作业。为保障线路高峰时段的运营供车能力,需规避车底长时间扣修导致的用车缺口,因此提出灵活检修策略,该策略包含如下4条执行规则。

规则1:将实施频率较高的双周检和三月检作业分解为若干以半日为最小时间单位的作业包(简称为半日修),结合GB 50157—2013《地铁设计规范》相关规定,允许车辆段和停车场均具备双周检和三月检的作业条件。

规则2:双周检和三月检修程均包含无电作业和有电作业2部分,根据各级修程检修工作量差异,可分别将双周检和三月检拆分为2次和4次半日修作业,其中三月检的无电作业和有电作业均需

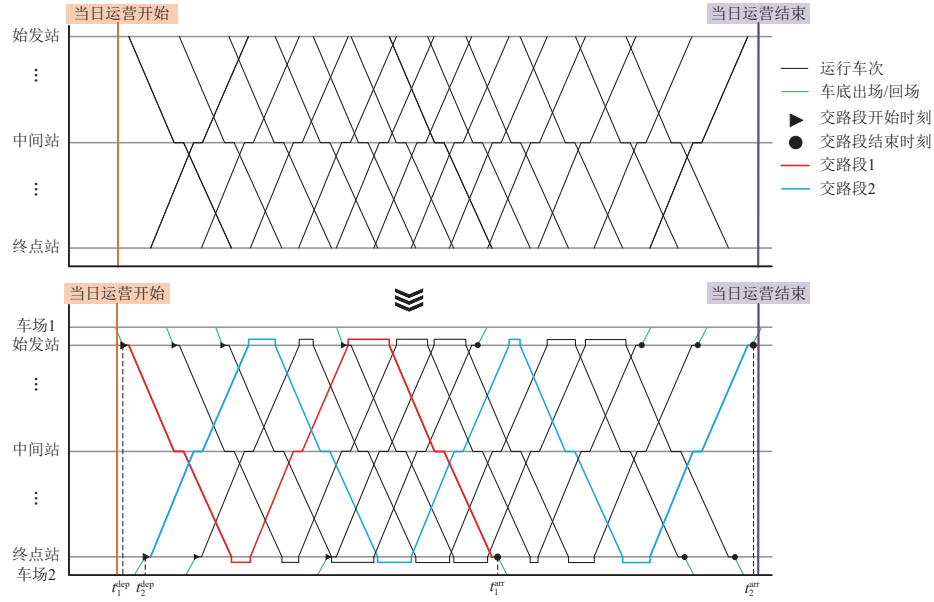


图1 交路段划分过程示意图

通过2次连续的半日修完成（避免车底反复出入检修库），允许车底在完成无电作业后出场执行交路段任务。

规则3：参考现场工作情况，规定半日修作业时段为上午 $[T_{1,dep}, T_{1,arr}]$ 时段和下午 $[T_{2,dep}, T_{2,arr}]$ 时段（两作业时段通常与线路运营高峰期存在重叠），在对应时段内完成的半日修分别记为半日修1和半日修2，由于1次半日修需覆盖1个完整时段，因此车底在同一天内无法同时执行早高峰任务与半日修1或晚高峰任务与半日修2。

规则4：灵活检修策略仅调整检修作业的执行时段与传统的连续扣修模式，并不改变修程规定的作业周期、作业内容和作业时长。

为便于开展研究，提出如下合理假设：①所有车底车型和编组形式相同，车场停放能力充足，不固定车底每日的停放和检修车场；②交路段任务信息和车底初始运用状态信息已知，不考虑计划期内出现突发事件的情况；③车底检修同时遵循修程的时间周期和里程周期规定（即时间和里程二者先到先修），其中三月检修程对双周检修程具有覆盖关系。

2 模型构建

以交路段任务数据和车底初始运用状态数据等作为输入，考虑交路段任务和检修任务执行、任务时空接续以及车底检修状态更新等约束，通过决策

车底承担的交路段任务以及检修时机和检修地点，实现运用方案所需车底数量和车底运行里程极差的双目标最小化。

2.1 变量及参数说明

为便于建模，定义如下集合： K 为运用车集合， $K=\{1, 2, \dots, N_K\}$ ， k 为索引， $k \in K$ ， N_K 为运用车总数； I 为交路段任务集合， $I=\{1, 2, \dots, N_I\}$ ， i 和 j 为索引， $i, j \in I$ ， N_I 为交路段任务总数； P 为研究日期集合， $P=\{1, 2, \dots, N_P\}$ ， p 为索引， $p \in P$ ， N_P 为规划期长度； D 为车场集合， $D=\{1, 2\}$ ，其中元素1和元素2分别表示车辆段和停车场， d 为索引， $d \in D$ ； R 为日常修程类型集合， $R=\{1, 2\}$ ，其中元素1和元素2分别表示双周检修程和三月检修程， r 为索引， $r \in R$ ； H 为半日修类型集合， $H=\{1, 2\}$ ，其中元素1和元素2分别表示半日修1和半日修2， h 为索引， $h \in H$ 。

模型决策变量定义如下： $x_{k,i,j}$ 为判断车底承担交路段任务接续关系的0-1决策变量，若车底 k 承担交路段任务 i 与交路段任务 j 的接续，则该变量取值为1，否则取值为0； $f_{i,k}$ 为判断车底执行首项交路段任务的0-1决策变量，若交路段任务 i 属于车底 k 执行的首项交路段任务，则该变量取值为1，否则取值为0； $e_{i,k}$ 为判断车底执行末项交路段任务的0-1决策变量，若交路段任务 i 属于车底 k 执行的末项交路段任务，则该变量取值为1，否则取值为0； $u_{k,i}$ 为判断车底执行交路段任务后是否回场检修的0-1决策变量，若车底 k 在完成交路段任务 i 后回

场检修,则该变量取值为1,否则取值为0; $v_{k,i}$ 为判断车底检修后是否出场的0-1决策变量,若车底 k 在检修完成后出场执行交路段任务 i ,则该变量取值为1,否则取值为0; $y_{k,d,p,r,h}$ 为判断车底检修时空关系的0-1决策变量,若车底 k 于第 p 日在车场 d 执行 r 级修程下的半日修 h ,则该变量取值为1,否则取值为0。中间变量定义如下: l_k 为车底 k 在计划期内的总运行里程; $l_{k,n,r}$ 和 $t_{k,n,r}$ 分别为车底 k 在第 n 次 r 级检修周期内的累计运行里程和累计运行时间; $p_{k,n,r}$ 为车底 k 第 n 次 r 级检修的完成日期 (若 $n=0$, 则该日期取计划期开始的前一天); $P_{k,n,r}$ 为车底 k 第 n 次 r 级检修周期内所有日期的集合。

模型参数定义如下: ω_1 和 ω_2 分别为模型2个优化目标的权重; $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 分别为运用方案所需车底数量的理论最大值和最小值; $L_{R,\max}$ 和 $L_{R,\min}$ 分别为所有上线车底运行里程极差的理论最大值和最小值; d_k 为车底 k 在计划期开始前的停放车场; $d_{i,\text{dep}}$ 和 $d_{i,\text{arr}}$ 分别为交路段任务 i 的始发、终到车场; $t_{i,\text{dep}}$ 和 $t_{i,\text{arr}}$ 分别为交路段任务 i 的开始、结束时刻; p_i , l_i 和 t_i 分别为交路段任务 i 的执行日期、运行里程和运行时间; $T_{h,\text{dep}}$ 和 $T_{h,\text{arr}}$ 为半日修 h 的开始、结束时刻; $Z_{d,r}$ 为车场 d 内的 r 级检修列位数量; $L_{r,\max}$ 和 $L_{r,\min}$ 分别为 r 级修程规定的检修里程上、下限; $T_{r,\max}$ 和 $T_{r,\min}$ 分别为 r 级修程规定的检修时间上、下限; $l_{k,0,r}$ 和 $t_{k,0,r}$ 分别为 r 级修程下车底 k 在计划期开始前的初始运行里程和初始运行时间; M 为1个极大的正数。

2.2 目标函数

考虑车底日常检修需求的运用计划优化问题,需在运用车数量 Z_1 和所有运用车的运行里程极差 Z_2 这2个目标间权衡。因量纲不同,考虑以二者经归一化处理后的加权和作为模型的目标函数 Z ,其表达式为

$$Z = \min \left(\omega_1 \frac{Z_1 - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} + \omega_2 \frac{Z_2 - L_{R,\min}}{L_{R,\max} - L_{R,\min}} \right) \quad (1)$$

其中,

$$Z_1 = \sum_{k \in K} \max_{i,j \in I} x_{k,i,j}$$

$$Z_2 = \max_{k \in K, l_k > 0} l_k - \min_{k \in K, l_k > 0} l_k$$

2.3 约束条件

模型主要考虑3类约束条件,分别为任务执行约束、任务时空接续约束和车底检修状态约束。

1) 任务执行约束

每个交路段任务的紧前接续任务、紧后接续任务唯一,2项约束分别为

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{k,i,j} \leq 1 \quad \forall j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{k,i,j} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

当交路段任务 i 的始发车场与车底 k 的所属车场不同时,任务 i 不得被选为车底 k 的首项交路段任务,该约束为

$$f_{i,k} = 0 \quad \forall (i,k) \in \Phi_1 \quad (4)$$

其中,

$$\Phi_1 = \{(i,k) | i \in I, k \in K, d_k \neq d_{i,\text{dep}}\}$$

对于任意车底 k ,其首项交路段任务无紧前接续,末项交路段任务无紧后接续,2项约束分别为

$$\sum_{j \in I} x_{k,j,i} \leq M(1 - f_{i,k}) \quad \forall i \in I, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I} x_{k,i,j} \leq M(1 - e_{i,k}) \quad \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

运用方案所需车底数量不得超过运用车总数,即应在给定运用车数量的条件下完成所有交路段任务的分配,该约束为

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} f_{i,k} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{k,i,j} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} v_{k,i} = N_I \quad (7)$$

车底完成一次 r 级检修需满足对应的半日修执行次数要求,且在同一日的同一半日修时段内至多执行一次半日修任务,2项约束分别为

$$\sum_{d \in D} \sum_{p=p_{k,n-1,r}+1}^{p_{k,n,r}} \sum_{h \in H} y_{k,d,p,r,h} = 2r \quad \forall k \in K, n \geq 1, r \in R \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{r \in R} y_{k,d,p,r,h} \leq 1 \quad \forall k \in K, p \in P, h \in H \quad (9)$$

由于三月检的无电或有电作业均需通过2次连续的半日修完成,因此若车底 k 第 p 日执行了三月检修程下的半日修1,则须在同一车场且前后相邻的半日修时段内(前一日半日修2或当日半日修2)再完成1次半日修;同理,若车底 k 第 p 日执行了三月检修程下的半日修2,则须配套执行第 p 日的半日修1或第 $p+1$ 日的半日修1,以确保三月检作业的连续性。为刻画上述约束,通过以下2类情形构建不等式。

(1) 三月检在上午半日修时段完成,参数 r 取值为2, h 取值为1,邻接前续日期索引定义为 $p' = \max(p-1, 1)$,对应约束为

$$y_{k,d,p,r,h} \leq y_{k,d,p',r,h+1} + y_{k,d,p,r,h+1} \quad \forall k \in K, d \in D, n \geq 1, p \in P_{k,n,r} \quad (10)$$

其中,

$$P_{k,n,r} = [p_{k,n-1,r} + 1, p_{k,n,r}] \quad \forall k \in K, n \geq 1, r \in R$$

(2) 三月检在下午半日修时段完成, 参数 r 取值为 2, h 取值为 2, 邻接后续日期索引定义为 $p' = \min(p+1, N_p)$, 对应约束为

$$y_{k,d,p,r,h} \leq y_{k,d,p,r,h-1} + y_{k,d,p',r,h-1} \quad \forall k \in K, d \in D, n \geq 1, p \in P_{k,n,r} \quad (11)$$

2) 任务时空接续约束

若交路段任务 i 接续交路段任务 j , 则任务 i 的终到车场与任务 j 的始发车场需相同, 且任务 i 的结束时刻需早于任务 j 的开始时刻, 该约束为

$$x_{k,i,j} = 0 \quad \forall (i,j) \in \Phi_2, k \in K \quad (12)$$

其中,

$$\Phi_2 = \{(i,j) | i \in I, j \in I, d_{i,arr} \neq d_{j,dep}, p_i > p_j \vee (p_i = p_j \wedge t_{i,arr} > t_{j,dep})\}$$

针对车底完成交路段任务后执行检修任务的情况, 若车底 k 完成交路段任务 i 后执行第 p 日的半日修 h , 则半日修执行车场与任务 i 的终到车场需相同, 且半日修开始时刻需晚于任务 i 的结束时刻, 该约束为

$$\sum_{r \in R} y_{k,d,p,r,h} \geq 1 - M(1 - u_{k,i}) \quad \forall k \in K, d = d_{i,arr}, p \in \Phi_3, h \in H, i \in I \quad (13)$$

其中,

$$\Phi_3 = \{p | p > p_i \vee (p = p_i \wedge T_{h,dep} > t_{i,arr})\} \cap P$$

针对车底检修结束后执行交路段任务的情况, 若车底 k 完成第 p 日的半日修 h 后执行交路段任务 i , 则半日修执行车场与任务 i 的始发车场需相同, 且半日修完成时间需早于任务 i 的开始时刻, 该约束为

$$\sum_{r \in R} y_{k,d,p,r,h} \geq 1 - M(1 - v_{k,i}) \quad \forall k \in K, d = d_{i,dep}, p \in \Phi_4, h \in H, i \in I \quad (14)$$

其中,

$$\Phi_4 = \{p | p < p_i \vee (p = p_i \wedge T_{h,arr} < t_{i,dep})\} \cap P$$

为避免车底的运检安排出现冲突, 规定车底在检修期间不得执行交路段任务, 该约束为

$$\sum_{j \in I} (x_{k,i,j} + x_{k,j,i}) + f_{i,k} + e_{i,k} \leq M(1 - y_{k,d,p,r,h}) \quad \forall k \in K, i \in \Phi_5, d \in D, p = p_i, r \in R, h \in H \quad (15)$$

其中,

$$\Phi_5 = \{i | (t_{i,dep} > T_{h,dep} \wedge t_{i,dep} < T_{h,arr}) \vee (t_{i,arr} > T_{h,dep} \wedge t_{i,arr} < T_{h,arr})\} \cap I$$

车底的检修安排受到车场检修能力的限制, 即同时在车场 d 执行 r 级检修的车底数量不得超过对应的检修列位数量, 该约束为

$$\sum_{k \in K} y_{k,d,p,r,h} \leq Z_{d,r} \quad \forall d \in D, p \in P, r \in R, h \in H \quad (16)$$

3) 车底检修状态约束

为避免车底欠修, 对于任意车底 k , 其累计运行里程、累计运行时间不能超过对应的检修周期上限, 2项约束分别为

$$l_{k,n,r} \leq L_{r,max} \quad \forall k \in K, n \geq 1, r \in R \quad (17)$$

$$t_{k,n,r} \leq T_{r,max} \quad \forall k \in K, n \geq 1, r \in R \quad (18)$$

为避免车底过修, 当车底累计运行里程、累计运行时间均未达到检修周期下限时, 不允许其执行检修, 该约束为

$$y_{k,d,p,r,h} \leq \max\left(\frac{l_{k,n,r}}{L_{r,min}}, \frac{t_{k,n,r}}{T_{r,min}}\right) \quad \forall k \in K, d \in D, r \in R, h \in H, n \geq 1, p \in P_{k,n,r} \quad (19)$$

在完成交路段任务后, 需对车底的累计运行里程与累计运行时间进行更新。具体来说, 车底 k 第 n 次 r 级检修周期内的累计运行里程为日期集合 $P_{k,n,r}$ 内该车底所执行的全部交路段任务里程之和, 其中首次检修周期内的里程计算需额外考虑初始运行里程 $l_{k,0,r}$ 的影响, 该约束为

$$l_{k,n,r} = \begin{cases} \sum_{i \in \Phi_6} l_i \left(f_{i,k} + \sum_{j \in \Phi_6} x_{k,j,i} + v_{k,i} \right) & \forall k \in K, n > 1, r \in R \\ l_{k,0,r} + \sum_{i \in \Phi_6} l_i \left(f_{i,k} + \sum_{j \in \Phi_6} x_{k,j,i} + v_{k,i} \right) & \forall k \in K, n = 1, r \in R \end{cases} \quad (20)$$

其中,

$$\Phi_6 = \{i | i \in I \wedge p_i \in P_{k,n,r}\}$$

同理, 车底的累计运行时间更新规则为

$$t_{k,n,r} = \begin{cases} \sum_{i \in \Phi_6} t_i \left(f_{i,k} + \sum_{j \in \Phi_6} x_{k,j,i} + v_{k,i} \right) & \forall k \in K, n > 1, r \in R \\ t_{k,0,r} + \sum_{i \in \Phi_6} t_i \left(f_{i,k} + \sum_{j \in \Phi_6} x_{k,j,i} + v_{k,i} \right) & \forall k \in K, n = 1, r \in R \end{cases} \quad (21)$$

为计算车底运行里程极差目标, 需统计各车底

在规划期内的总运行里程,即车底所执行的全部交路段任务里程之和,该约束为

$$l_k = \sum_{i \in I} l_i \left(f_{i,k} + \sum_{j \in I} x_{k,j,i} + v_{k,i} \right) \quad \forall k \in K \quad (22)$$

3 求解算法

针对上述大规模组合优化模型,现有研究常采用蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)算法进行求解。然而,ACO算法存在全局搜索能力低、易陷入局部最优等缺陷。自适应大邻域搜索(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)算法可解决超大规模问题,因此,设计1种融合大邻域搜索策略的自适应混合蚁群优化(Adaptive Hybrid Ant Colony Optimization, AHACO)算法,通过优化ACO算法的核心机制提高搜索效率,并嵌入具有多种破坏、修复算子的邻域搜索过程,增强其跳出局部最优的能力。

3.1 改进的蚁群优化算法核心机制

针对ACO算法存在的交路段任务接续单一、车底检修安排不均衡、路径信息素重复累积等缺陷,作出如下改进。

(1) 完善交路段任务接续规则:为提高交路段任务接续多样性,对于未达到检修要求的车底,则倾向于接续发车时间较早的交路段任务;对于已达到检修要求但仍存在可接续任务的车底,则优先选择运行里程较短的交路段任务,避免车底超负荷运行。

(2) 改进检修任务执行条件:为控制车底运行里程与检修标准里程间的差异,避免过修与欠修现象频繁发生,规定运行里程接近检修标准里程的车底有较大概率执行检修,车底检修概率随运行里程的增加逐渐增大至1。

(3) 优化信息素更新策略:为提高算法全局搜索能力,仅对当代最优解与前代最优解中差异化路径上的信息素进行局部更新,降低相邻2代最优解中重复路径上的信息素积累速度。

改进的蚁群优化(Improved Ant Colony Optimization, IACO)算法生成初始解的步骤如下。

步骤1:输入交路段任务集合 I 和运用车集合 K ,初始化交路段接续期望值矩阵和信息素矩阵,随机选择一列车底 k 作为任务执行车底(蚂蚁),将 $K \setminus \{k\}$ 赋值给 K ,执行步骤2。

步骤2:若 I 为空集,直接跳转至步骤6;否则

结合时空接续约束和检修周期约束生成备选交路段集合 A_k 。若 A_k 为空集,跳转至步骤5,否则基于交路段接续规则和轮盘赌选择策略为车底 k 选择交路段任务 i ,将 $I \setminus \{i\}$ 赋值给 I ,执行步骤3。

步骤3:判断车底 k 是否满足双周检或三月检的执行条件(检修优先级为三月检优先),若满足则执行步骤4,否则返回步骤2。

步骤4:考虑车场检修能力约束,为车底 k 安排半日修作业(三月检需连续执行2次半日修),并判断是否满足半日修执行次数要求,若满足则重置车底 k 的累计运行里程和累计运行时间,并跳转至步骤2,否则直接跳转至步骤2。

步骤5:判断车底 k 是否存在未完成的检修任务,若存在则为车底 k 连续安排剩余半日修作业,同时重置车底 k 的运用状态,并跳转至步骤2;否则随机选择新的车底 k 作为执行车底,将 $K \setminus \{k\}$ 赋值给 K ,跳转至步骤2。

步骤6:输出初始解,并根据各车底的交路段任务执行路径更新全网信息素,结束循环。

3.2 基于ALNS的邻域搜索策略

蚁群优化类算法迭代后期,信息素常集中于少数局部最优路径,正反馈机制将加速算法早熟收敛,进而抑制全局探索能力。针对该问题,AHACO算法在IACO算法的基础上嵌入大邻域搜索策略,同时为避免频繁扰动影响蚁群优化类算法的正常收敛过程,仅在当代最优目标值劣于前代最优目标值时才调用邻域策略的破坏、修复算子。破坏算子通过移除若干交路段任务,打破高信息素浓度路径对应的局部搜索区域;修复算子则通过诱导车底探索潜在的更优路径,将移除任务重新插入各车底的运用方案中以形成修复解,为后续搜索引入多样性。经邻域搜索产生的“精英解”将用于后续迭代的信息素更新,可进一步强化该类算法正反馈机制的学习过程。结合研究问题特征设计如下邻域搜索算子。

1) 破坏算子

通过对当前解进行可控扰动拆解,从不同维度打破原有任务分配结构,具体包含3类差异化破坏算子:①随机破坏算子,随机删除当代最优解中的若干交路段任务;②接续不均衡破坏算子,删除当代最优解中任务接续时间较长的交路段任务及其后续任务;③运用不均衡破坏算子,删除当代最优解中总运行里程较大和较小的车底运用方案中的交路段任务。

2) 修复算子

将当前解被破坏后产生的未执行交路段任务分配给各个车底,设计2类算子进行修复操作:①贪心修复算子,可依次选择执行时间最早的交路段任务,将其分配给接续时间最早的车底;②均衡修复算子,可依次选择当前总运行里程最小的车底,为车底分配交路段任务至无可接续任务。

邻域搜索开始前,所有算子均被赋予相同的初始权重。邻域搜索过程中,对各算子的权重进行自适应更新:①每次邻域搜索时,根据当前各算子的权重计算其被选择的概率,并采取轮盘赌策略分别选择一个破坏算子和一个修复算子,协同执行本次邻域搜索并生成修复解;②根据修复解的质量(如是否为新的全局最优解、是否优于当前解等),对被选择算子赋予相应分数;③记录每次邻域搜索结束后各算子的累计调用次数与累计得分,并对算子权重进行自适应更新^[7]。AHACO算法求解车底运用问题的具体流程如图2所示。首先通过IACO算法得到当代最优解并更新全网信息素,然后调用ALNS算子进行邻域搜索,并根据修复解的质量更新全局最优解和算子权重,直至满足终止条件。

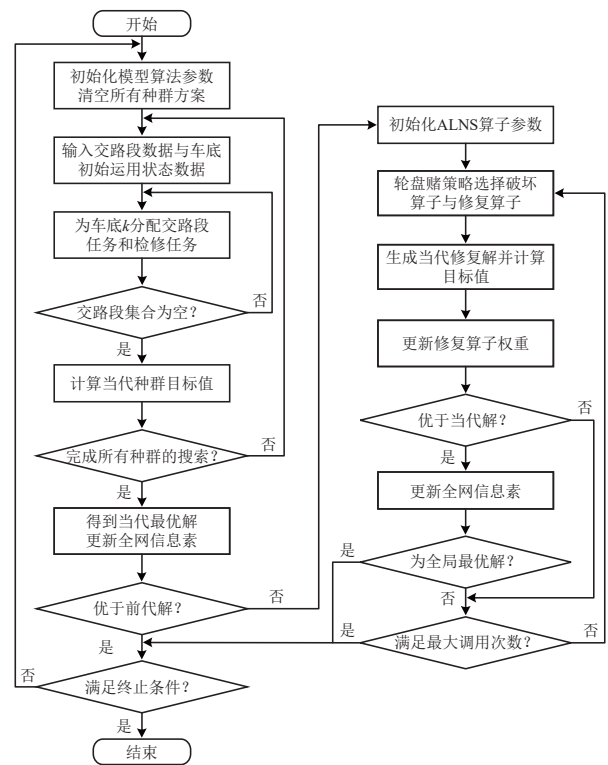


图2 AHACO算法流程

65列,其中包括车辆段44列、停车场21列,研究周期为28天,部分车底初始运行状态信息和交路段任务信息见表1和表2。其中,早、晚高峰交路段记作运行0.5 d,全日交路段记作运行1 d;研究周期内共计1 888个交路段任务,由652个全日任务、688个早高峰任务以及548个晚高峰任务构成,每个工作日和双休日分别有72和56个任务。

4 案例研究

4.1 案例背景

选取某市配置一段一场且分别位于线路两端的实际地铁线路进行案例研究,线路配属车规模为

表1 车底初始状态信息(部分)

车底号	所属车场	双周检初始里程/km	双周检初始时间/d	三月检初始里程/km	三月检初始时间/d
1	1	4 533	13	19 438	58
2	1	4 425	13	4 425	13
3	2	4 320	13	19 301	58
4	2	4 253	12	24 367	72
5	1	4 205	12	14 205	42

表2 交路段任务信息(部分)

交路段号	执行日期/d	始发车场	终到车场	开始时刻	结束时刻	运行里程/km	运行时间/d
101	1	1	1	4:50:00	19:41:01	432	1
102	1	1	2	4:56:55	9:33:10	135	0.5
103	1	1	1	5:01:25	19:53:01	432	1
104	1	1	1	5:05:33	19:57:01	432	1
105	1	1	1	5:09:33	10:41:22	162	0.5

为兼顾运用车数量和车底运用均衡性,模型参数设置如下:两目标权重 ω_1 和 ω_2 均取值为0.5;最大运用车数量 $N_{\max}$ 取值为65列,等同于配属车

总规模;最小运用车数量 $N_{\min}$ 取值为55列,该数值为仅考虑目标 Z_1 时运行1 000代得到的最小上线列车数;最大运行里程极差 $L_{R,\max}$ 取值为9 801 km,

该数值为仅考虑目标 Z_2 时运行1 000代后所有可行方案运行里程极差的最大值；最小运行里程极差 $L_{R,\min}$ 取理论值0；半日修1和半日修2集中作业时段分别为[08:00, 12:00]与[14:00, 18:00]；极大正数 M 取值为10 000；车场1和车场2对 $Z_{d,1}$ 分别取6列位与4列位，对 $Z_{d,2}$ 分别取3列位与0列位；双周检和三月检里程范围分别为[4 500, 5 500] km与[28 500, 31 500] km，双周检、三月检时间范围分别为[12, 16] d与[86, 94] d。

4.2 优化效果

设定AHACO算法的种群规模为50个，最大迭代次数为150次，每代邻域搜索算子最大调用次数为50次，分别对考虑传统检修（Traditional

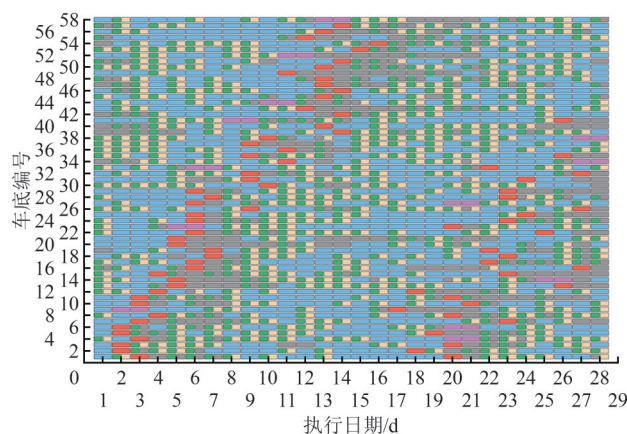
Maintenance, TM）策略与灵活检修（Flexible Maintenance, FM）策略的优化模型进行求解。不同检修策略下的模型求解结果见表3。由表3可知：在车底运用方面，FM策略能够在节省2列运用车的同时缩小各列车的运行里程差异，使最优目标值减少41.61%；在车底检修方面，FM策略可减少4次双周检和2次三月检（总停时减少8 d），使车底平均上线时间增加0.78 d。说明FM策略的车底上线和检修决策更加灵活，通过优化运用车数量、检修次数、车底运行里程差异和车底平均上线时间，可有效降低车底购置成本和检修成本，提高车底运用均衡性和运用效率。

表3 优化结果

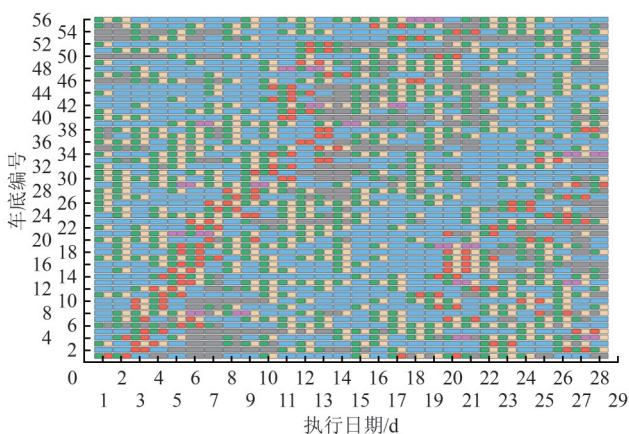
运用方案名称	运用车数量/列	运行里程极差/km	最优目标值	运行里程标准差/km	双周检次数/次	三月检次数/次	平均上线时间/d
TM策略	58	2 808	0.293 2	766.46	79	13	21.90
FM策略	56	2 376	0.171 2	679.54	75	11	22.68

不同检修策略下的车底运用方案如图3所示。由图3可知：TM策略下每日运用状态较为固化，日均用车数为52.29列，其中检修车仅占3.75列（均执行全天扣修）；与TM策略相比，FM策略下的车底检修作业不局限于全天扣修模式，日均检修车数量虽增加至6.32列，但其中87%的车底实现

了“检修当日仍上线运行”，且有63.92%的检修被安排在下午时段以满足早高峰用车需求，使日均用车数降低至51.46列。这表明FM策略通过在线需求较小的时段集中安排检修作业，不仅释放了高峰运营时段的运力供给，还提高了车底运用均衡性与运用效率。



(a) 传统检修策略



(b) 灵活检修策略

早高峰交路 晚高峰交路 全日交路 双周检作业 三月检作业 车场库停

图3 不同检修策略下车底运用方案

4.3 算法有效性

为验证所提AHACO算法的有效性，设计如下对比试验：以经典ACO算法为基准，对比仅改进信息素更新机制和状态转移机制的IACO算法，以及在其基础上进一步融合ALNS策略的AHACO算法。3种算法的种群规模、最大迭代次数等参数

设定与4.2节相同。在ACO算法与IACO算法中，若当代最优解劣于前代最优解，则重新执行本轮迭代。不同算法求解结果见表4。由表4可知：相比于ACO算法，IACO算法与AHACO算法所得最优方案的目标值分别减少9.51%和15.62%，并分别使运行里程极差降低12.61%和20.72%，表明

表4 算法有效性对比

算法名称	运用车数量/列	运行里程极差/km	最优目标值	求解时间/s
ACO	56	2 997	0.202 9	18 713
IACO	56	2 619	0.183 6	19 938
AHACO	56	2 376	0.171 2	20 589

启发式信息的改进和邻域搜索策略的引入均对求解质量有不同程度的提升。

算法收敛情况如图4所示。由图4可知：ACO算法在第54代即进入平稳状态，但最终目标值偏高，表明其较早陷入局部最优；IACO算法的收敛代数推迟至第65代，改进状态转移和信息素更新机制在一定程度上延缓了早熟收敛，但迭代后期收敛曲线趋于水平，目标函数的优化提升空间有限；AHACO算法虽收敛代数最晚（第96代），但其收敛曲线在迭代中后期仍保持明显的下降趋势，表明嵌入的邻域搜索策略能够有效引导算法持续探索更优解空间。此外，由于邻域搜索过程的计算复杂度通常高于构建解的过程，AHACO算法的求解时长

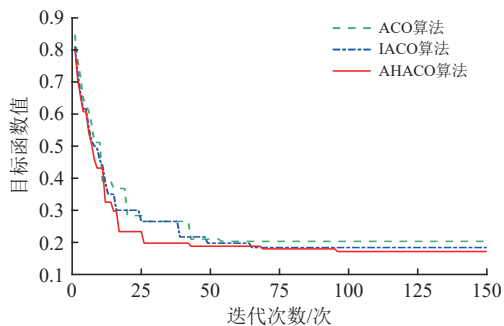


图4 算法收敛曲线

较ACO算法和IACO算法平均增加约6.65%，但结合表4中最优目标值和运行里程极差的改善幅度来看，AHACO算法仅付出小幅计算代价即可实现更突出的方案优化效果。

4.4 车场检修能力影响

车场检修能力变化将直接影响车底运用和检修过程，由于三月检修程不包含列车解编、部件分解等复杂操作，可对案例线路停车场内的停车列检线进行升级改造（如加设车顶和车侧检修平台），使其具备三月检作业条件。在线路双周检和三月检列位总量不变的情况下，两车场不同检修能力敏感性结果见表5。通常车辆段检修能力更高，故不考虑其双周检、三月检列位少于停车场的情况。由表5可知：在检修时段选择方面，与用车需求更高的早高峰时段（或半日修1作业时段）相比，优化方案倾向于将检修作业安排在晚高峰时段（或半日修2作业时段）和双休日时段执行，所有列位配置场景中半日修2占全部半日修的平均比例为62.35%，各场景中检修发生在双休日的平均占比为40.19%（双休日时间占计划期的比例仅为28.57%）；在检修列位配置方面，车场1双周检、车场2双周检、车场1三月检和车场2三月检的列位数量分别为6，4，2和1时，可同时优化运用车数量和运行里程极差，相较于其他方案，最优方案虽使车底总扣修时间平均增加2天，但该方案将检修作业占用晚高峰时段和双休日时段的比例分别提高至64.50%和42.00%，可更好地兼顾各车场内的车底检修需求，使方案目标值平均减少16.67%。

表5 车场检修能力敏感性

双周检能力/列位		三月检能力/列位		运用车数量/列	运行里程极差/km	最优目标值	车底总检修时间/d	半日修占比/%			
车场1	车场2	车场1	车场2					半日修1	半日修2	工作日	双休日
6	4	3	0	56	2 376	0.171 2	97	36.08	63.92	58.76	41.24
		2	1	56	2 160	0.160 2	100	35.50	64.50	58.00	42.00
7	3	3	0	57	2 295	0.217 1	98	39.29	60.71	61.73	38.27
		2	1	56	2 457	0.175 3	99	36.87	63.13	58.08	41.92
5	5	3	0	57	2 484	0.226 7	97	39.18	60.82	61.86	38.14
		2	1	56	2 619	0.183 6	100	38.00	62.00	60.50	39.50

5 结 语

针对城市轨道交通车底运检冲突问题，提出融合双周检与三月检分时、分地执行灵活检修策略的多级修程车底运用计划优化方法，构建以运用车数量和车底运行里程极差最小化为目标的双目标优化

模型，并设计融合大邻域搜索策略的自适应混合蚁群优化算法进行模型求解。与传统检修策略相比，灵活检修策略可同时优化方案所需运用车数量（减少2列）和各车底的运行里程差异（降低432 km），使最优目标值减少41.61%，并通过优化车底总检修时间（减少8 d），使车底平均上线时间增加0.78

d; 在求解车底运用问题时, 对比经典蚁群优化算法, 融合大邻域搜索策略的自适应混合蚁群优化算法可显著提升全局搜索能力并避免过早收敛, 从而得到优化效果更好的车底运用方案; 对比不同列位配置场景下的最优方案, 在晚高峰时段、双休日时段执行的半日修占全部半日修的平均比例分别为62.35%和40.19%, 通过优先安排车底在运营压力较小的时段执行检修, 从而为运营高峰时段提供更多可用车底; 当车场1与车场2的双周检能力分别为6列位和4列位, 三月检能力分别为2列位和1列位时, 可兼顾各车场的车底检修需求, 进而得到

运用车数量和运行里程极差最小的运用方案, 相比于其他列位配置方案, 该方案可使目标值平均减少16.67%。

本文仅围绕车底日常周期性检修约束构建灵活检修策略, 暂未纳入长周期高级修程对车底运用计划的影响, 后续可进一步拓展包含定期高级修约束的交路优化研究; 同时以单线单车辆基地的城轨线路为研究场景, 未来可深入探究多线路车辆基地资源共享机制, 开展轨道交通成网运营条件下多线车底协同运用优化相关研究。

参 考 文 献

- [1] Li Tao, Li Dewei, Ji Haotian, et al. Integrated optimization of train timetabling, stop planning, rolling stock maintenance and assignment with flexible train composition and short-turning strategies[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2026, 207(c): 104566.
- [2] Chen Zebin, Li Shukai, D'ariano A, et al. Real-time optimization for train regulation and stop-skipping adjustment strategy of urban rail transit lines[J]. *Omega*, 2022, 110: 102631.
- [3] Zhou Housheng, Qi Jianguo, Yang Lixing, et al. Joint optimization of train timetabling and rolling stock circulation planning: a novel flexible train composition mode [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 162: 352-385.
- [4] 金波, 郭佑星, 王青元, 等. 考虑大小交路的时刻表与车底运用计划一体化编制方法[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(3): 173-181.
Jin Bo, Guo Youxing, Wang Qingyuan, et al. Integrated scheduling method of timetable and rolling stock assignment scheme considering long and short routing[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(3): 173-181.
- [5] Yang Anan, Wang Bo, Huang Jianling, et al. Service replanning in urban rail transit networks: cross-line express trains for reducing the number of passenger transfers and travel time[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102629.
- [6] 史峰, 涂纤, 赵烁. 面向O-D时变需求的城轨列车运行计划优化方法[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(1): 115-125.
Shi Feng, Tu Xian, Zhao Shuo. Optimization method of urban rail train operational plan based on O-D time-varying demand[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(1): 115-125.
- [7] 张松亮, 李得伟, 尹永昊. 需求响应机制下轨道交通出行预约与列车运行计划优化方法[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(4): 285-294.
Zhang Songliang, Li Dewei, Yin Yonghao. Trip reservation and train operation plan optimization method of urban rail transit under demand responsive mechanism[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(4): 285-294.
- [8] Lian Deheng, Mo Pengli, D'ariano A, et al. Energy-saving time allocation strategy with uncertain dwell times in urban rail transit: two-stage stochastic model and nested dynamic programming framework[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 317(1): 219-242.
- [9] Wang Pengling, Xiao Xiaofang, Nießen N. Flexible rolling stock composition strategy in urban rail transit lines: the influences of various train units and station capacities[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 162: 104609.
- [10] 李茜, 李蔚, 曹悦, 等. 基于DDDQN的城轨列车节能运行控制方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(12): 4960-4970.
Li Qian, Li Wei, Cao Yue, et al. Research on energy-saving operation control method of urban rail train based on DDDQN[J].

- Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(12): 4960-4970.
- [11] Gao Yuan, Xia Jun, D'ariano A, et al. Weekly rolling stock planning in Chinese high-speed rail networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 158: 295-322.
- [12] 林柏梁, 沈姚铭, 钟文健, 等. 车底数最小化的动车组交路计划优化[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(5): 210-221.
Lin Boliang, Shen Yaoming, Zhong Wenjian, et al. Optimization of the electric multiple units circulation plan with the minimum number of train-set[J]. China Railway Science, 2023, 44(5): 210-221.
- [13] Wang Jiaxi. Maintenance scheduling at high-speed train depots: an optimization approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: 109809.
- [14] 沈姚铭, 林柏梁, 薛锦波, 等. 高铁动车组长周期高级修计划优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 396-407.
Shen Yaoming, Lin Boliang, Xue Jinbo, et al. Optimization method of long cycle high-level maintenance plan for high-speed EMUs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 396-407.
- [15] Zhou Wenliang, Li Sha, Kang Jing, et al. Capacity-oriented train scheduling of high-speed railway considering the operation and maintenance of rolling stock[J]. Mathematics, 2022, 10(10): 1639.
- [16] Folco P, Sahli A, Belmokhtar-berraf S, et al. A rolling horizon for rolling stock maintenance scheduling problem with cyclical activities[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 196: 110460.
- [17] Canca D, Barrena E. The integrated rolling stock circulation and depot location problem in railway rapid transit systems[J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review, 2018, 109: 115-138.
- [18] 彭其渊, 廖珮茹, 何必胜, 等. 全天候运行条件下的城市轨道交通车底运用与检修协同优化[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6): 194-206.
Peng Qiyuan, Liao Peiru, He Bisheng, et al. Collaborative optimization of rolling stock operation and maintenance of urban rail transit under all-day operation[J]. China Railway Science, 2022, 43(6): 194-206.
- [19] Lai Yungcheng, Fan Dowchung, Huang Kweilong. Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 85: 284-295.
- [20] 张波. 考虑车底检修计划的城市轨道交通车底运用计划编制优化研究与系统研发[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Zhang Bo. Research on optimal utilization plan and system development of urban rail transit rolling stocks considering maintenance plan[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [21] 冯佳, 李国威, 付义龙, 等. 共享车辆基地的城轨车底运用与检修计划协同编制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 131-140.
Feng Jia, Li Guowei, Fu Yilong, et al. Integrated rolling stock scheduling and maintenance scheduling optimization of urban rail transit lines based on shared train depot[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 131-140.
- [22] 姜建萍, 徐永能, 吴任飞, 等. 基于时空网络的地铁车辆运用与检修优化模型[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 171-176.
Jiang Jianping, Xu Yongneng, Wu Renfei, et al. Optimization model of metro vehicle operation and maintenance based on spatio-temporal network[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11): 171-176.
- [23] 徐鹏, 辛丽平, 张增超, 等. 基于改进果蝇算法的地铁列车运用计划编制研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(9): 195-207.
Xu Peng, Xin Liping, Zhang Zengchao, et al. Scheduling train operation plans for subway based on improved drosophila algorithm[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(9): 195-207.

Optimization method for rolling stock operation scheduling plan in urban rail transit system considering daily flexible maintenance

Chen Zhexuan¹, Chen Shaokuan^{1,2}, Liu Shuang^{1,2}, Bai Yun^{1,2}, Gao Chen¹

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Integrated Transport Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To alleviate the contradiction between daily maintenance and continuous operation of urban rail transit rolling stock, an optimization method of the rolling stock scheduling plan was proposed considering multi-level maintenance programs, which integrated a flexible maintenance strategy that enabled bi-weekly and quarterly maintenance tasks to be performed at various times and locations. With dual objectives of minimizing the number of rolling stock and the range of operational mileage, an optimization model was formulated incorporating the constraints such as the execution of tasks, spatio-temporal continuity between tasks, and the updating of rolling stock maintenance statuses. To address low search efficiency and susceptibility to local optima in classical heuristic algorithms, an adaptive hybrid ant colony optimization (AHACO) algorithm was designed through the large neighborhood search strategy for model solution, and then a case study was conducted based on an actual urban rail transit line. The results indicate that compared with traditional maintenance strategy, the optimization method with flexible maintenance strategy reduces 2 train sets, decreases the range of operational mileage by 432 km, and extends average operating time for rolling stocks by 0.78 d. Under various maintenance capacity conditions, when the depot capacities for bi-weekly and quarterly maintenance slightly exceed those of parking lot, the rolling stock maintenance requirements in both locations can be satisfied simultaneously, obtaining an optimal scheme with minimal train sets and range of operational mileage. This method can save costs for both the rolling stock acquisition and maintenance, and further improve the operational efficiency and operational equilibrium of rolling stocks.

Key words: Urban rail transit; Rolling stock scheduling plan; Flexible maintenance strategy; Daily maintenance program; Adaptive hybrid ant colony optimization (AHACO) algorithm

(责任编辑 杨婧婕)