文章编号：1003-1421(2026)05-0119-12
引用格式：辛丽平，魏代兴，刘守元，等.考虑资源均衡配置的地铁双车辆段车底运用计划优化研究[J].铁道运输与经济，2026，48(5)：119-130.
XIN Liping，WEI Daixing，LIU Shouyuan，et al. Optimization of Rolling Stock Utilization Plan for Metro Dual-Depots Considering Balanced Resource Allocation[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：119-130.

考虑资源均衡配置的地铁双车辆段车底运用计划优化研究

辛丽平[1]，魏代兴[1]，刘守元[1]，宋晓轩[1]，张增超[2]

(1.青岛理工大学 信息与控制工程学院，山东 青岛 266520；2.济南中车四方所智能装备科技有限公司 产品开发中心，山东 青岛 266031)

摘 要：为实现车底资源的均衡配置，在综合考虑车底的运行里程、检修安排和双车辆段检修能力等约束的基础上，以车底与车次的总匹配成本最小为优化目标建立一种车底运用计划编制模型，将模型中的车底运用问题转换为柔性车间调度问题，并采用混合果蝇-遗传优化算法进行求解。在编制车底每日运用计划时，先基于车底的月修后里程和累计总里程2个指标，利用层次分析法求解车底的运行顺序，再严格按指派适应值为车次分配车底。为检验模型的可行性，以北京地铁某号线的数据为例进行分析。实验结果表明：与现有方案相比，研究方案在同等条件下求解指派适应值的收敛速度更快；不但实现车底资源的均衡配置，还能使60 d运行周期内的总匹配成本降低6.4%。在计划检修方面，模型求解的检修日期更具合理性，能去除因检修不及时所致的安全隐患，实现检修资源的合理利用。

关键词：车底运用计划；资源均衡配置；层次分析法；混合果蝇-遗传算法；柔性车间调度
中图分类号：U231 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250328005

Optimization of Rolling Stock Utilization Plan for Metro Dual-Depots Considering Balanced Resource Allocation

XIN Liping[1]，WEI Daixing[1]，LIU Shouyuan[1]，SONG Xiaoxuan[1]，ZHANG Zengchao[2]

(1. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China;
2. Product Development Center, Jinan CRRC Sifang Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Qingdao 266031, Shandong, China)

Abstract: To achieve balanced allocation of rolling stock resources, an optimization model for compiling rolling stock utilization plans was established in this paper with the objective of minimizing the total matching cost between rolling stock and train services via comprehensively considering constraints such as operational mileage, maintenance schedules, and dual-depot maintenance capacity. The rolling stock utilization problem in the model was converted into a flexible job-shop scheduling problem, and a hybrid fruit fly-genetic optimization algorithm was

收稿日期：2025-03-28
通信作者：魏代兴(2001—)，男，山东日照人，青岛理工大学信息与控制工程学院硕士研究生。
基金项目：山东省自然科学基金项目(ZR2025MS1101，ZR2021MF076，ZR2016FB04)；国家自然科学基金项目(201606141)；山东省重点研发项目(2018GHY115025)；中国博士后面上项目(2018M642611)

adopted for solution. When compiling the daily utilization plan of rolling stock, the operational sequence of rolling stock was first solved using the analytic hierarchy process based on two metrics: post-monthly-maintenance mileage and cumulative total mileage, and then rolling stock was strictly allocated to train services according to assignment fitness values. To verify the feasibility of the model, data from a Beijing Metro line were taken as an example for analysis. Experimental results show that compared with existing schemes, the proposed scheme has a faster convergence speed in solving assignment fitness values under identical conditions; it not only realizes the balanced allocation of rolling stock resources but also reduces the total matching cost within a 60-day operational cycle by 6.4%. In terms of planned maintenance, the maintenance dates solved by the model are more rational, which can eliminate safety hazards caused by untimely maintenance and achieve the rational utilization of maintenance resources.

Keywords: Rolling Stock Utilization Plan; Balanced Resource Allocation; Analytic Hierarchy Process; Hybrid Fruit Fly–Genetic Algorithm; Flexible Job-Shop Scheduling

0　引言

随着轨道交通线路规模的扩展和城市客流量的持续增长，单车辆段的列车运维模式已难以满足当前的运营需求，引入多车辆段列车运维模式能够有效适应复杂的运营环境[1-2]。但有关多车辆段的车底运用安排仍面临诸多挑战，如车底的运用计划编制、检修计划的合理安排以及在提高经济效益和服务质量之间的平衡[3-4]。因此，如何合理编制多车辆段车底的运用计划和检修安排，对于实现资源均衡配置和提升整体运营效能具有至关重要的作用。

国内外学者对于动车组列车运用优化问题已做了大量研究并取得了较好成果，这为后续开展地铁列车的车底运用计划编制研究提供可借鉴的思路。王忠凯等[5]在给定列车运行图和运用交路的情况下，为减少动车组车底的使用和节省检修成本，建立了动车组列车的运用与检修计划编制模型。陈然等[6]以动车组使用数目与检修次数最少为目标，构建双目标规划优化模型，并设计专家系统指导的最大最小蚁群算法进行求解。Hong等[7]提出两阶段优化策略，先通过放宽检修约束求得最低成本的路径，再基于路径交换生成满足检修要求且成本效益最高的动车组运行交路。Wang等[8]为实现列车运行与检修的综合优化，构建了混合整数线性规划模型，并利用商业求解器CPLEX进行求解。Lin等[9]通过建立0-1整数线性规划模型，对动车组的检修计划进行优化，使检修计划更具合理性。以上研究均考虑了检修计划对动车组列车运用的影响，但未考虑动车组列车是否能得到均衡运用。陈旻瑜等[10]建立的0-1整数规划模型使车底得到均衡运用的同时，以动车组检修里程、接续时间和地点为约束条件，得出车底使用成本最小的运用方案。魏国静等[11]在已知当日列车运行图和行驶里程数的前提下，针对车底总接续时间和列车使用率等多目标进行优化，从而实现动车组列车的均衡运用。Li等[12]在考虑车底行驶里程要求和检修周期的约束下，基于均衡运用原则，以检修周期内动车组行驶里程最大化为目标，建立了相应的0-1整数规划模型。臧瑶等[13]为缩小临近检修时所有车底行驶里程的差值，提出了一种基于改进的最优-最差蚁群算法(BWAS)的单日运营优化方案。然而，这些研究均聚焦于收发车站位于同一车辆段的情况，并不适用于线路更复杂的多车辆段的车底运用安排。姜建萍等[14]将车底运用和检修计划的制定转化为一个复杂的连续时空网络组合路径优化问题。彭其渊等[15]以运营效益最大化为目标，建立了车底运用与检修协同优化的网络流线性模型。文献[14-15]针对多车辆段的车底运用计划进行了研究，但没有考虑检修日期对车底长期运用计划的影响。因此，在综合考虑车底检修计划和资源均衡运用的基础上开展地铁双车辆段车底的运用计划优化研究，对提升地铁整体运营效能具有重要意义。

以北京地铁某号线的数据为例，基于混合果蝇-遗传算法建立一种地铁双车辆段的车底运用计划优化模型，并将车底与车次的匹配问题转换为柔性车间调度问题进行求解。为提高求解过程的搜索效率与解的质量，先利用遗传算法进行全局搜索并生成初始种群，再引入果蝇算法的嗅觉搜索公式对

初始种群做精细化的局部搜索，以获得60 d内总匹配成本(指参与运营的车底与车次的总指派适应值)最低的车底运用方案。

1　问题描述及分析

针对双车辆段车底运用计划编制问题的研究，在已知车底和车次信息的前提下，综合考虑检修日期、车辆段检修能力以及特定车次的需求，对一个周期内的车底运用计划做综合规划；确保在满足运营需求的同时，按时进行必要的检修，提高车底运用的安全性。某地铁线路有A，B 2个车辆段，A车辆段配属的车底数量为a、始发的车次数量为p；B车辆段配属的车底数量为b，始发的车次数量为q，即该线路的车底数有$(a+b)$组、车次$(p+q)$趟。将一天内只运行早、晚高峰的车次定义为特殊车次(特殊车次的行驶里程数不超过351.5 km)，其余车次定义为正常车次；则该线路共有k趟特殊车次，$n(n=p+q-k)$趟正常车次。车底的日常检修任务可在A车辆段也可在B车辆段进行，但月修和里程修任务均要在B车辆段完成。月修里程标准为2万km，车底每运行2万 km就需进行一次月修，月修后车底的月修里程清零。里程修里程标准有40万 km和75万 km，当车底累计总里程达到相应的里程修标准时进行一次里程修，里程修后车底的累计总里程保持原值而月修里程会被清0。车底的累计总里程是随车底运行而逐渐增加的，车底是否定修(包括月修和里程修)对其无影响。

车底的每日运用计划编制需根据车底当前的运行里程(包括月修后里程和累计总里程)、配属车辆段信息以及车次信息，遵循指派适应值最小化原则，制定车底与车次的最佳匹配方案。而在编制车底运用计划方案时，若编制周期过短，则难以全面判断车底运用是否合理。因此，为凸显该方案在车底资源均衡配置以及检修计划合理性方面的优势，以60 d内的车底与车次的总匹配成本(即参与运营的车底与车次的总指派适应值)最小为优化目标建立一个长期的车底运用计划编制模型。拟解决的关键问题是统筹考虑2个车辆段所有车底与车次的情况，从多组车底–车次匹配计划方案中选出一个满足车底资源均衡配置和检修要求，且整体匹配成本最低的方案。

2　构建数学模型

2.1　模型假设

为便于建模，突出研究重心，提出以下假设。

(1) 日常运行车次已定，若需增添额外车次，需要由指派员从没有参与当日运行的车底中按运用排名依次调度空闲车底。

(2) 特殊车次由早、晚高峰时段的2个车次组成，安排其由一个车底连续承担，特殊车次的行驶里程数为该车底在2次运行任务结束后返回车辆段的里程之和。

(3) A车辆段仅当作停车场使用，提供日常的清洗、检修工作；B车辆段除承担日常检修工作外还承担月修和里程修工作，因此达到月修、里程修标准的车底都要返回B车辆段完成检修。

(4) 股道列位占用合理，车底每日的停放股道不对次日匹配车次产生影响。

(5) 只考虑月修和里程修的检修安排，当月修和里程修结束后，车底的月修后里程数均清零，但累计总里程数保持不变。

2.2　建立模型

研究用到的集合与变量如表1所示。

在车底运用计划编制时，需根据车底当天的运行里程以及车次行驶里程数，计算$C'_{i,t}$和C_j的值，进而求解当天的指派适应值$C_{ij,t}$。$C_{ij,t}$越小，表示模型计算的车底与车次匹配程度越高，即车底运用计划编制越合理。因此，模型以车底与车次的总匹配成本(即60 d的总指派适应值)最小为优化目标，对车底和车次进行统一编制，模型的目标函数如公式(1)所示。

$$\min\left(\sum_{i=1}^{a+b}\sum_{j=1}^{p+q}\sum_{t=1}^{N}C_{ij,t}\cdot X_{ij,t}\right) \tag{1}$$

$C_{ij,t}$的计算公式如公式(2)所示。

$$C_{ij,t}=\left|C'_{i,t}-C_j\right| \tag{2}$$

$C_{i,t}$的计算公式如公式(3)所示。

$$C_{i,t}=w_1\cdot C_{Ri,t}+w_2\cdot C_{mi,t} \tag{3}$$

式中：w_1和w_2分别为车底的月修后里程和累计总里程的权重值(求解过程详见3.1)。

模型的约束条件如公式(4)所示。

表1　集合与变量

Tab.1　Sets and variables

类型	符号	含义
变量	C_{Ri}	按车底i的月修后里程数从小到大排序的名次
	$C_{Ri,\ t}$	车底i在第t天月修后里程数的排名
	C_{mi}	按车底i的累计总里程数从小到大排序的名次
	$C_{mi,\ t}$	车底i在第t天累计总里程数的排名
	C_i	车底i运行顺序值，由车底的月修后里程和累计总里程决定
	$C_{i,\ t}$	车底i在第t天的运行顺序值
	C'_i	按车底运行顺序值C_i由小到大排序的名次
	$C'_{i,\ t}$	车底i在第t天运行顺序值的排名
	C_j	按车次j的行驶里程数由大到小排序的名次
	C_{ij}	车底i与车次j的指派适应值
	$C_{ij,\ t}$	车底i与车次j在第t天的指派适应值
	X_{ij}	车底i和车次j的匹配关系，1表示是，0表示否
	$X_{ij,\ t}$	在第t天，车底i和车次j的匹配关系
	$U_{i,\ t}$	在第t天，车底i是否可运用，1表示是，0表示否
	$L_{i,\ t}$	在第t天，车底i是否里程修，1表示是，0表示否
	$M_{i,\ t}$	在第t天，车底i是否月修，1表示是，0表示否
	D_j	特殊车次j的首次入库和二次出库是否在同一车辆段，1表示是，0表示否
集合	E	$E=\{E_J,\ E_Z\}$为所有车底集合
	E_J	$E_J=\{E_{J,\ i}\mid i=1,\ 2,\ \cdots,\ a\}$为A车辆段的车底集合
	E_Z	$E_Z=\{E_{Z,\ i}\mid i=1,\ 2,\ \cdots,\ b\}$为B车辆段的车底集合
	F_J	$F_J=\{F_{J,\ j}\mid j=1,\ 2,\ \cdots,\ p\}$为由A车辆段发车的车次集合
	F_Z	$F_Z=\{F_{Z,\ j}\mid j=1,\ 2,\ \cdots,\ q\}$为由B车辆段发车的车次集合
	F_K	$F_K=\{F_{K,\ j}\mid j=1,\ 2,\ \cdots,\ k\}$为特殊车次集合
	F_N	$F_N=\{F_{N,\ j}\mid j=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$为正常车次集合
	T	$T=\{T_t\mid t=1,\ 2,\ \cdots,\ N\}$为计划编制天数集合

$$\text{s.t.}\begin{cases} U_{i,\ t}=1 & \forall i\in E,\ \forall t\in T \\ \sum_{j=1}^{p}X_{ij,\ t}\leqslant 1 & \forall i\in E_J,\ \forall t\in T \\ \sum_{j=1}^{q}X_{ij,\ t}\leqslant 1 & \forall i\in E_Z,\ \forall t\in T \\ \sum_{i=1}^{a}X_{ij,\ t}=1 & \forall j\in F_J,\ \forall t\in T \\ \sum_{i=1}^{b}X_{ij,\ t}=1 & \forall j\in F_Z,\ \forall t\in T \\ \sum_{i=1}^{a+b}X_{ij,\ t}=1 & \forall j\in F_k,\ \forall t\in T \\ D_j=1 & \forall j\in F_K \\ \sum_{i=1}^{b}L_{i,\ t}\leqslant 2 & \forall i\in E_Z,\ \forall t\in T \\ \sum_{i=1}^{b}M_{i,\ t}\leqslant 3 & \forall i\in E_Z,\ \forall t\in T \end{cases} \tag{4}$$

式中：$U_{i,\ t}=1$，$\forall i\in E$，$\forall t\in T$表示参与运行的车底在当日内可运用；$\sum_{j=1}^{p}X_{ij,\ t}\leqslant 1$，$\forall i\in E_J$，$\forall t\in T$和$\sum_{j=1}^{q}X_{ij,\ t}\leqslant 1$，$\forall i\in E_Z$，$\forall t\in T$表示A、B车辆段的每组车底每日最多只能担当同车辆段的一个车次；$\sum_{i=1}^{a}X_{ij,\ t}=1$，$\forall j\in F_J$，$\forall t\in T$和$\sum_{i=1}^{b}X_{ij,\ t}=1$，$\forall j\in F_Z$，$\forall t\in T$表示每个从A，B车辆段发车的车次每日只能由同车辆段的一个车底担当；$\sum_{i=1}^{a+b}X_{ij,\ t}=1$，$\forall j\in F_K$，$\forall t\in T$表示每个特殊车次每日只能指派给一个车底；$D_j=1$，$\forall j\in F_K$表示特殊车次的首次入库和二次出库的所在车辆段相同；$\sum_{i=1}^{b}L_{i,\ t}\leqslant 2$，$\forall i\in E_Z$，$\forall t\in T$和$\sum_{i=1}^{b}M_{i,\ t}\leqslant 3$，$\forall i\in E_Z$，$\forall t\in T$表示在B车辆段最多同时有2组车底在里程修，3组车底在月修。

3　模型求解

模型求解包含车底运行顺序的求解以及车底运用计划编制；其中，车底运用计划编制又进一步细分为：车底当日运用状态设置、算法说明以及求解过程。

3.1　车底运行顺序求解

车底运行顺序可反映车底实际已使用的情况，其值越小，表示车底的月修后里程和累计总里程都相对较低，后续应优先安排行驶里程数较大的车次任务。通常，月修后里程更能反映车底的近期状态，短期内对车底运行顺序影响较大；累计总里程则反映车底长期使用情况，在日常运行中其变化较为缓慢，短期内对车底运行顺序影响较小。基于层次分析法求解月修后里程的权重值w_1和累计总里程的权重值w_2。由于月修后里程相较于累计总里程对车底运行顺序的影响更为重要，所以将月修里程与累计总里程的重要性之比定为2∶1。

判断矩阵构造形式如表2所示，矩阵中的元素$a_{ij}(i=1,\ 2;\ j=1,\ 2)$表示月修里程、累计总里程两两间的重要性之比，$a_{ij}$满足如公式(5)所示的约束条件。矩阵对角线元素$a_{11}$和$a_{22}$表示同一指标的重要性之比，故均为1；$a_{12}$表示月修里程与累计总里程的重要性之比，故为2；$a_{21}$表示累计总里程与月修

后里程的重要性之比，故为0.5。因此，判断矩阵$\boldsymbol{C}$的表达式可写为公式(6)的形式。

表2　判断矩阵构造形式

Tab.2　Construction form of judgment matrix

指标	月修后里程	累计总里程
月修后里程	a_{11}	a_{12}
累计总里程	a_{21}	a_{22}

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ij} = \dfrac{1}{a_{ji}} \\ a_{ij} = 1,\ i = j \end{cases} \tag{5}$$

$$C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0.5 & 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

为检验所构建的判断矩阵是否符合逻辑，需先对判断矩阵$\boldsymbol{C}$进行一致性检验。由于$\boldsymbol{C}$是二阶矩阵，其一致性比率CR恒为0，所以判断矩阵$\boldsymbol{C}$满足一致性要求。

依据判断矩阵C，采用几何平均法(即方根法)求解月修里程和累计总里程的权重值分别为w_1 = 0.667，w_2 = 0.333。

3.2　车底运用计划编制

3.2.1　车底当日运用状态设置

在编制当日车底运用计划时，需首先设置车底当日的运用状态，车底每日运用状态设置如图1所示。A，B车辆段内无故障车底原则上均可参与当日的运营计划编制，但实际上车底当日是否可用还受定修安排和当日已运行里程数(月修后里程和累积总里程)的影响。每个车底只能担当其所在车辆段的车次任务，且只能通过换站车次去往另一车辆段。例如，A车辆段达到定修里程的车底需要安排一次A—B换站的车次任务才可抵达B车辆段并进行定修。设置在A车辆段的车底的月修里程标准为2万 km，若无超过2万 km的车底，可将月修里程标准放宽至1.95万 km，里程修里程标准为40万 km和75万 km；在B车辆段的车底的月修里程标准为2万 km，里程修里程标准为40万 km和75万 km。若车底的运行里程数达到定修里程但未到检修时间，将该状态的车底挑选并标记为排名最靠后。

A车辆段内无故障的车底，如果当日已运行里程数达到定修里程，无论明日是否定修，都可安排

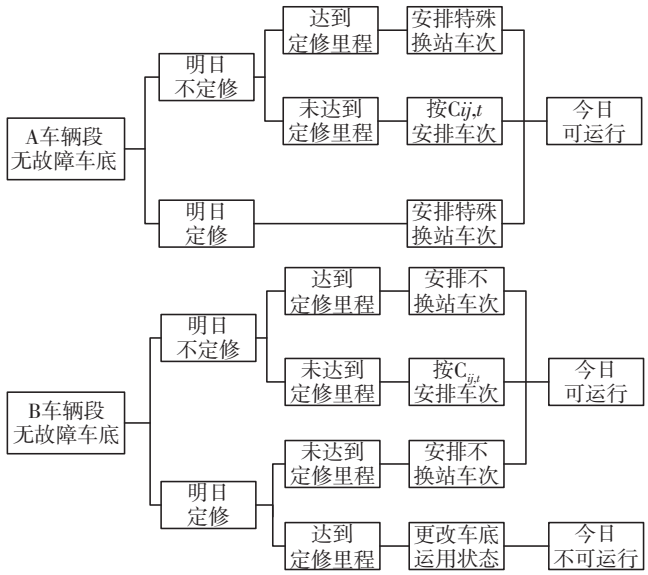


图1　车底每日运用状态设置

Fig.1　Daily utilization status settings of rolling stock

A—B换站的特殊车次，这类车的状态设置为今日可运用；如果当日已运行里程数未达到定修里程，无论明日是否定修，都可按照指派适应值分配相应车次，这类车的状态设置为今日可运用。

B车辆段内无故障的车底，如果当日已运行里程数达到定修里程且今日定修，这类车的状态设置为今日不可运用；如果当日已运行里程数达到定修里程但今日不定修，可安排B—B不换站的特殊车次，这类车的状态设置为今日可运用。如果当日已运行里程数未达到定修里程且明日定修，可安排B—B不换站的特殊车次，这类车的状态设置为今日可运用；如果当日已运行里程数未达到定修里程但明日不定修则可按照指派适应值分配相应车次，这类车的状态设置为今日可运用。

3.2.2　算法说明

为方便求解，将车底的运用问题转化为车间调度问题进行分析。将车次指派车底的操作比作一个工件在每道工序中选择机器加工的过程，工序与机器的组合既为车次与车底的匹配关系X_{ij}，每道工序的加工时间既为一组车底与车次的指派适应值。经过转换，车底运用计划编制的过程可分为如下4个步骤。

步骤1：对工序和机器进行编码，染色体编码如表3所示，每个染色体都代表29组工序和机器的匹配关系。

表3　染色体编码

Tab.3　Chromosome coding

工序	1	2	3	……	27	28	29
机器	2	9	13	……	35	36	27

步骤2：计算工件在各个工序所选机器的加工时间。

步骤3：对于特定工序，选择指定的机器加工处理。

步骤4：在进行工序分配时，除特殊工序和特定机器外，需为剩余的工序依次选择机器加工，直至所有工序都分配给相应的机器，并记录完成所有任务的总加工时间。

上述模型要解决是一种规模复杂的离散优化问题，又被视为一种特殊的指派类问题，也可归类于NP-Hard难题。在编制以60 d为周期的车底运用计划时需要考虑相互关联且动态变化的因素，如车底停放的车辆段、检修计划的安排，以及每日的运用计划情况等，都会对后续的运用计划编制产生影响。因此，针对该类规模复杂且存在多种可行解的问题，大多采用启发式算法进行求解。与常规优化算法相比，果蝇算法[16]具有结构简单、控制参数少、搜索能力强等优点，尤其适合解决复杂的柔性车间问题(FJSP)。但考虑到果蝇算法存在易陷入局部最优解的风险，为了丰富种群多样性、提升果蝇算法的全局搜索能力，先利用遗传算法[17]对初始种群进行选择和变异，保留适应度较高的新个体，并以此生成新的种群，再通过果蝇算法进行细致的局部搜索求得最终的最优解，模型求解基本流程如图2所示。

算法的求解过程包括7个步骤。

步骤1：计算个体适应度值 $f(u)$，u=1，2，…，100，每个适应度值代表29组车底与车次的指派适应值之和的倒数。

步骤2：统计种群个体的适应度值并根据轮盘赌法选择个体。

步骤3：根据所选个体的适应度值，通过自适应变异概率$P_\mu(u)$判断是否进行变异，如公式(7)所示。

$$P_\mu(u)=\begin{cases} k2-\dfrac{(k2-k1)\left(f(u)-f_{\text{avg}}\right)}{f_{\max}-f_{\text{avg}}} & f(u)>f_{\text{avg}} \\ k2 & f(u)\leqslant f_{\text{avg}} \end{cases} \tag{7}$$

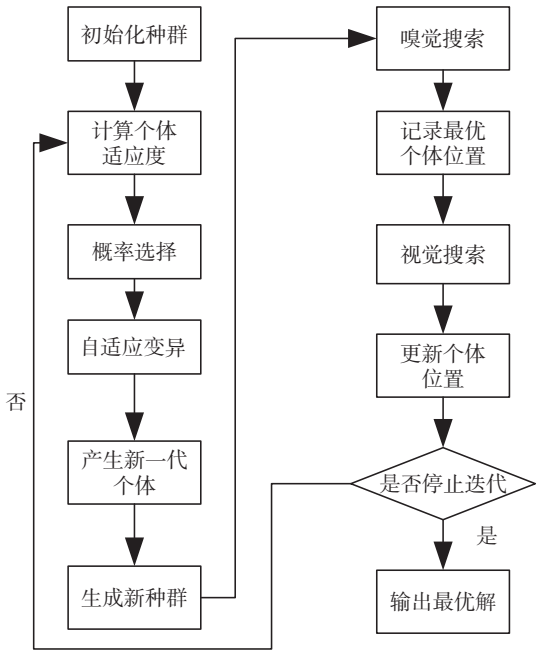


图2　模型求解流程

Fig.2　Model solution process

式中：$f_{\max}$和f_{avg}分别是种群的最大适应度和平均适应度，$k1$ = 0.25，$k2$ = 0.5。

步骤4：通过选择、变异操作筛选出适应度较高的子代个体作为新的种群。

步骤5：将新的种群利用果蝇算法进行优化，此处借鉴文献[4]中的嗅觉搜索方法。

步骤6：果蝇个体通过嗅觉搜索公式探测食物源并记录找到的最优位置。

步骤7：其余果蝇则通过视觉搜索向最优位置聚集，并更新个体位置。

求解时，根据文献[18]中的转换方法，将个体编码利用公式(8)计算果蝇的位置信息，利用文献[4]中的嗅觉搜索公式寻找最优果蝇的位置，并更新位置信息，最后利用公式(9)将更新后的果蝇位置信息转换为新的编码，即新的车底-车次匹配方案。

$$x(h)=\frac{2\delta}{z(h)-1}\left(y(h)-1\right)-\delta \quad z(h)\neq 1 \tag{8}$$

$$y(h)=\text{round}\left(\frac{x(h)+\delta}{2\delta}\left(z(h)+1\right)+1\right) \quad 1\leqslant h\leqslant 29 \tag{9}$$

式中：h为当前车次；$x(h)$为车次h求解的位置信息；δ=1；$z(h)$为车次h可选的车底数；$y(h)$表示车次h由第$y(h)$号车底担当。

3.2.3　求解过程

车底运用计划编制模型求解过程可分为如下10个步骤。

步骤1：初始化计划编制天数。

步骤2：初始化车底信息包括车底数量、行驶里程、检修时间以及定修情况，车次信息包括车次总数、车次行驶里程数、车次运行时间。

步骤3：根据车底与车次的匹配关系构建车底-车次匹配矩阵，矩阵中每个元素代表一组车底-车次的指派适应值。

步骤4：根据车底所停靠的车站、检修日期和当前运行里程，设置当日车底运用状态。

步骤5：初始化算法。包括种群数量、变异概率、搜索因子、搜索步长和最大迭代次数。

步骤6：遗传算法优化，将新种群中的每个个体视为果蝇个体，以模拟果蝇行为进行下一步优化。

步骤7：果蝇算法优化，找出并记录迭代过程中的最优果蝇个体，并更新位置信息。

步骤8：判断是否结束算法，若未达到算法的最大迭代次数，重复步骤6—步骤7；否则，停止迭代并输出最优解，即当日车底运用计划。

步骤9：自动月修安排。从B车辆段中没有车次指派的车底中，选出月修后里程数大于2万km且尚未到检修日期的车底，安排进行月修，且安排同一天月修的数量不超过3组车底。

步骤10：判断是否结束迭代，若未达到计划编制天数，重复步骤2—步骤9；否则，结束迭代，输出在计划编制天数内总匹配成本最小的车底运用计划方案。

4　实验仿真

4.1　实验数据

2个车辆段共计配属38组车底，29个车次。车底信息如表4所示，包含车底的原修车时间(人工编制方案)、月修后里程、累计总里程和当前所在的车辆段等信息。在开始前，A车辆段停放的车底数为18组，在B车辆段停放的车底数为20组。基本车次信息如表5所示，特殊车次信息如表6所示。其中从A车辆段发出的车次有15个，B车辆段发出的车次有14个。编程在内存16GB、i5-1035G1 CPU的笔记本电脑上运行。设置种群个数为100，混合

表4　车底信息

Tab.4　Rolling stock information

车底	原修车情况	月修后里程/km	累计总里程/km	车辆段	里程修情况
1	—/2023-04-25月修	13 571.5	540 389.5	B	完成
2	2023-02-25—2023-03-24里程修	14 862.5	724 579.7	B	未完成
3	2023-02-24月修	20 190.2	584 553.7	B	完成
4	—	13 708.5	593 586.2	B	完成
5	2023-03-03月修	16 552.0	603 687.0	B	完成
6	2023-02-04月修	18 453.0	584 172.0	B	完成
7	—	3 175.5	487 047.5	B	完成
8	2023-03-01/2023-04-15月修	17 905.5	627 579.2	B	完成
9	2023-03-18月修	0	414 152.1	B	完成
10	2023-02-22月修	2 330.0	703 082.2	B	完成
11	—/2023-04-29月修	7 410.5	429 439.0	B	完成
12	2023-01-25-2023-02-24里程修	8 028.5	728 894.2	B	定修中
13	—/2023-04-14月修	9 544.5	454 574.0	B	完成
14	—	4 803.5	568 530.5	B	完成
15	2023-03-04月修	16 358.0	540 619.0	B	完成
16	—	7 431.5	710 701.0	B	完成
17	2023-03-31月修	0	432 762.0	B	完成
18	—	11 660.0	419 850.5	B	完成
19	—/2023-04-19月修	6 032.0	451 482.5	B	完成
20	2023-03-30月修	16 740.0	441 925.0	B	完成
21	2023-03-29月修	16 291.5	99 889.0	A	未完成
22	2023-02-09月修	5 967.5	88 764.0	A	未完成
23	—	7 938.5	129 575.0	A	未完成
24	—/2023-04-27月修	7 333.0	133 781.5	A	未完成
25	2023-03-09月修	20 676.0	120 086.4	A	未完成
26	—	3 220.5	125 576.5	A	未完成
27	2023-02-20月修	3 818.5	86 038.1	A	未完成
28	2023-03-15月修	16 161.5	116 134.0	A	未完成
29	—/2023-04-23月修	13 302.0	114 186.8	A	未完成
30	—/2023-04-07月修	16 014.0	113 212.0	A	未完成
31	2023-02-19月修	20 082.0	99 321.5	A	未完成
32	—/2023-04-12月修	11 373.5	110 760.5	A	未完成
33	—	7 555.5	109 546.1	A	未完成
34	—/2023-04-28月修	17 121.5	100 578.5	A	未完成
35	—/2023-04-02月修	15 164.0	116 359.7	A	未完成
36	—	7 663.5	109 709.5	A	未完成
37	—/2023-04-22月修	12 275.5	112 751.3	A	未完成
38	2023-02-05月修	21 607.5	82 546.0	A	未完成

表5　基本车次信息

Tab.5　Basic train service information

车次	行驶里程/km	出库时间	出库车辆段	入库时间	是否换站
1	619.0	4:42:00	A	00:21:58	换
2	607.5	4:51:00	A	00:12:41	不换
3	607.5	4:59:00	A	00:19:41	不换
4	582.5	5:17:00	A	00:06:17	换
5	582.5	5:35:00	A	00:18:17	换
6	569.0	4:54:00	B	23:07:02	换
7	569.0	5:01:00	B	23:26:17	换
8	569.0	5:22:00	B	23:46:17	换
9	569.0	5:36:00	B	23:57:17	换
10	569.0	6:00:13	B	00:24:17	换
11	561.0	6:15:13	B	00:14:28	不换
12	560.5	4:55:00	A	22:39:02	换
13	549.5	5:06:15	A	22:50:32	换
14	547.0	6:47:13	B	00:05:41	换
15	524.5	5:32:00	A	23:36:17	换
16	516.0	5:43:00	A	22:18:59	不换
17	489.0	7:20:43	B	22:58:47	不换
18	480.5	4:47:00	A	20:01:32	换
19	480.5	5:38:39	A	21:11:17	换
20	409.0	5:08:00	B	18:20:17	不换
21	409.0	5:29:00	B	18:45:17	不换

果蝇-遗传算法最大迭代次数为100，计划编制天数为60，实验次数为10，取10次实验结果的最优结果为本研究最优的运用计划方案(以下简称“研究方案”)。

4.2　实验结果分析

研究方案下38组车底60 d运行周期内车底累计行驶里程变化如图3所示。各车底的初始行驶里程均为0 km，60 d后车底的累计行驶里程散布在[5 808 km，30 646 km]区间范围内，这是因为车底的行驶里程受车底运行顺序的影响，车底每日的运行顺序由车底当前的月修里程和累计总里程决定。

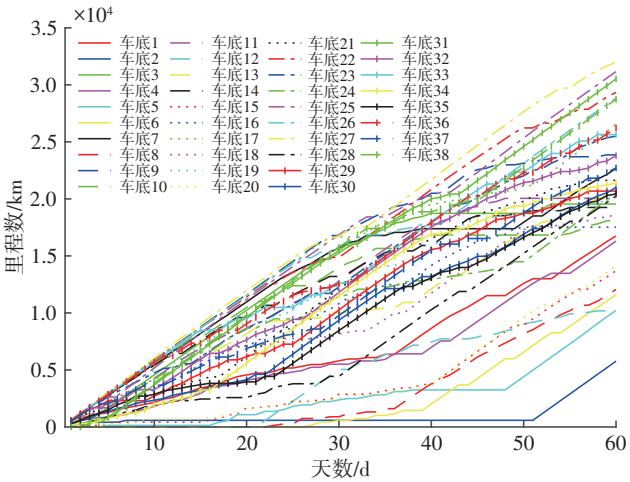


图3　运行周期内车底累计行驶里程变化

Fig.3　Cumulative driving mileage variation of rolling stock during operation cycle

其中，除2号、12号车底因在计划编制期间进行里程修导致长时间停用未参与运营外，部分车底如5号、6号和8号在运营周期的前20 d内也出现停用的情况其共同特点是月修后里程均在1.6万 km以上但未达定修标准，且累计总里程均在50万 km以上，鉴于其运行顺序排名靠后，短期内未安排运营。

运行周期内车底第1日的行驶里程如图4所示，横坐标是车底运行顺序值。图4a是在A车辆段停放的车底第1日的行驶里程，显然车底运行顺序值越小的车底其行驶里程就越大，即为大行驶里程的车次安排运行顺序值小的车底；21号和28号车底的

表6　特殊车次信息

Tab.6　Special train service information

车次	行驶里程/km	第1次出库	出库车辆段	第1次入库	第2次出库	第2次入库	是否换站
1	351.5	04:47:00	B	10:19:17	15:32:00	21:38:32	换
2	285.0	05:51:00	A	11:51:17	16:51:00	20:18:17	换
3	285.0	06:01:00	A	12:01:17	17:01:00	20:28:17	换
4	271.5	06:37:13	B	09:44:47	14:42:00	20:44:17	换
5	160.5	05:26:00	A	09:34:22	17:16:29	18:59:22	不换
6	149.0	06:18:17	B	09:58:22	17:40:29	19:23:22	换
7	139.0	06:42:17	B	10:04:22	17:52:29	19:35:22	换
8	125.0	06:45:29	A	09:52:22	17:46:29	19:29:22	不换

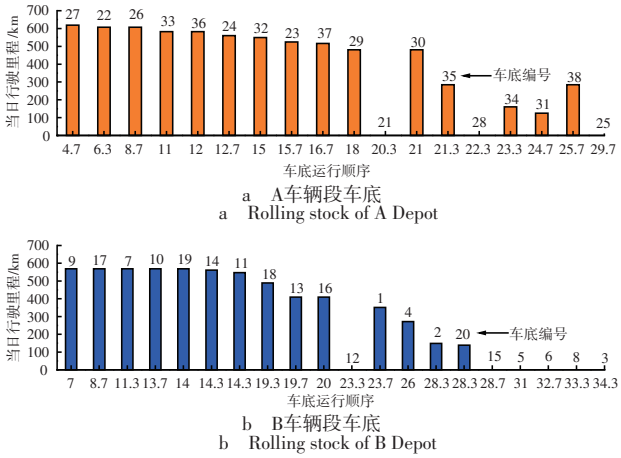


图4　运行周期内车底第一日的行驶里程

Fig.4　First-day driving mileage of rolling stock in operation cycle

运行顺序值分别为20.3和22.3，但第1日行驶里程为0 km(并未为其指定车次)，这是由于为车次分配车底时严格按照指派适应值最小化原则；38号车底运行顺序值为25.7，其行驶里程大于前车(31号车底，运行顺序值24.7)的行驶里程，这是因为该车底需要进行月修，而A车辆段无定修能力，必须为其指定特殊换站车次(即表6中的车次2)。图4b是在B车辆段停放的车底第1日的行驶里程，显然车底运行顺序值越小的车底其行驶里程就越大。总之，研究方案进行车底运用计划编制时先为大行驶里程的车次指派运行顺序值小的车底，即按照当日指派适应值最小化原则为车次分配车底；对于达到检修标准而尚未检修的车底和特殊车次进行单独考虑。

车底累计总里程如图5所示，反映38组车底的初始累计总里程和60 d运行周期内累计行驶里程。由图5可知，初始累计总里程小的车底运行周期内累计总里程增长明显、增幅较大(如25号、27号和31号车底)；而初始累计总里程大的车底累计总里程增幅较小(如2号、5号和12号车底)。可见，研究方案能提高累计总里程较小的车底使用频次，降低累计总里程较大的车底使用频次，进而实现车底资源的均衡优化配置。

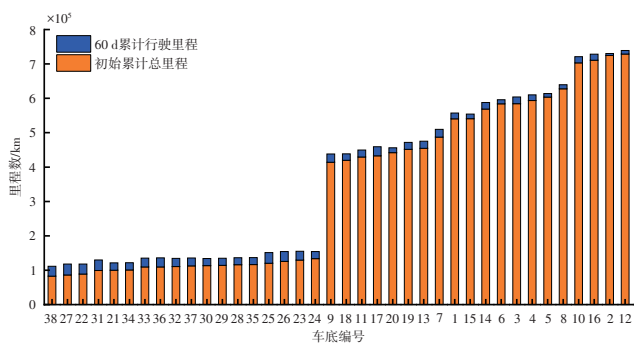


图5　车底累计总里程

Fig.5　Cumulative total mileage of rolling stock

为进一步分析研究方案的优越性，基于相同实验数据，将研究方案采用的车底运用计划编制方法及求解算法，与文献[4]中的对应方法(以下简称“对照方案”)进行对比。不同求解算法收敛性对比如图6所示，研究方案采用混合果蝇-遗传算法求解，对照方案采用文献[4]中的改进果蝇算法求解。由图6可知，收敛至最小指派适应值时，混合果蝇-遗传算法的收敛速度更快且精度更高，可见研究方案的求解算法优势更明显。

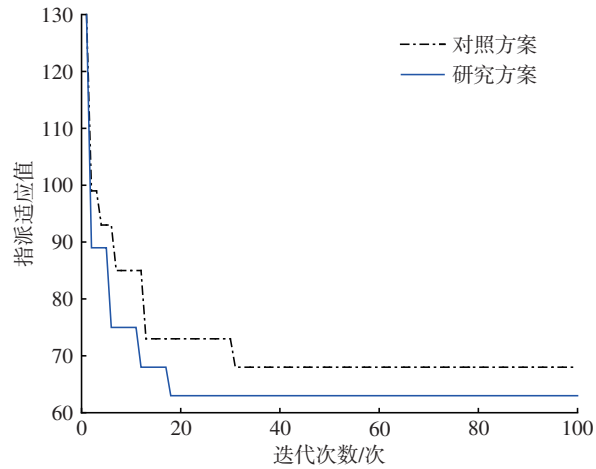
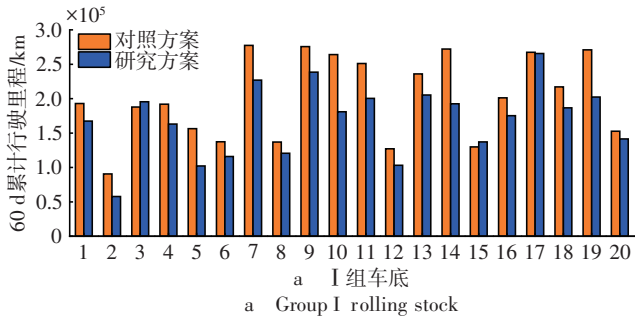


图6　不同求解算法收敛性对比

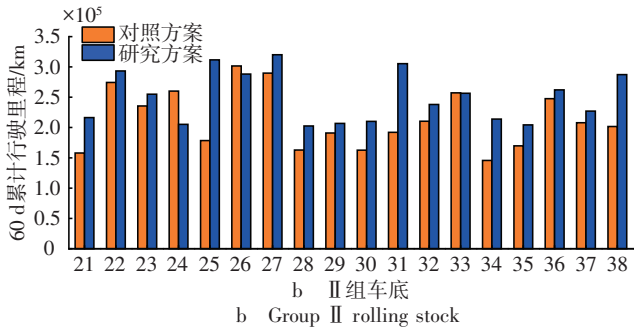
Fig.6　Convergence comparison of different solution algorithms

60 d车底累计行驶里程如图7所示，对比了2种方案60 d累计行驶里程。图7a是初始累计总里程大于40万km的车底(Ⅰ类车底)60 d累计行驶里程，研究方案下Ⅰ类车底60 d累计行驶里程普遍小于对照方案；图7b是初始累计总里程小于40万km的车底(Ⅱ类车底)60 d累计行驶里程，研究方案下Ⅱ类车底60 d的累计行驶里程普遍大于对照方案。行驶里程对比如表7所示，Ⅰ类车底研究方案的平均行驶里程比对照方案少3 289 km，Ⅱ类车底研究方案的平均行驶里程比对照方案多3 655 km。由此可见，相较于对照方案，研究方案可使累计总里程小的车底，其使用频次更多、运行周期内行驶里程更大，累计总里程大的车底，其使用频次更少、运行周期内行驶里程更小。研究方案能有效降低了2类



a　Ⅰ组车底

a　Group Ⅰ rolling stock



b　Ⅱ组车底

b　Group Ⅱ rolling stock

图7　60 d车底累计行驶里程

Fig.7　60-day cumulative driving mileage of rolling stock

表7　行驶里程对比　　km

Tab.7　Driving mileage comparison

车底	累计总里程	60 d平均行驶里程	
		对照方案	研究方案
Ⅰ组	>40万	20 180	16 891
Ⅱ组	<40万	21 367	25 022

车底间累计总里程的差距，使各车底的累计总里程更趋向于均衡化，避免了部分车底因过度使用而引起的安全隐患，延缓了部分车底的损耗速度，实现了车底资源的均衡配置。

在匹配成本方面，60 d运行周期内研究方案的总匹配成本(即总指派适应值)为4 550，比对照方案的4 257小293个单位，减少了6.4%。

在计划检修方面，与人工编制方案相比，研究方案给出的自动检修日期更具合理性。自动检修与人工检修日期对比如表8所示，表中前3组车底的自动检修日期比人工检修日期平均延后28 d，使车底的行驶里程尽可能接近定修标准里程再进行检修，避免了车底过早检修导致的检修资源浪费；后6组车底的自动检修日期相比人工方案均有提前，确保行驶里程达到定修标准的车底应修尽修，避免车辆在运行中存在因不及时检修而致的安全隐患。由此可见，模型编制的检修日期能使车底在2次检修间隔期间内的行驶里程均控制在2万 km左右，确保各车底在2次检修间隔期间内的行驶里程是均衡的。

5　结论

针对地铁双车辆段车底运用计划编制优化问题，综合考虑车底运行的里程数(月修后里程和累计总里程)、检修日期和车辆段检修能力等约束条件，提出一种新的车底运用方案，构建了地铁双车辆段车底运用计划编制模型，并利用混合果蝇-遗传算法进行模型求解。

(1) 与对照方案相比，研究方案能进一步增加累计总里程小的车底的使用频次，使其运行周期内行驶里程更大；能进一步减少累计总里程大的车底的使用频次，使其运行周期内行驶里程更小；从而更好地实现车底资源的均衡配置。在匹配成本方面，研究方案能够使60 d内的总匹配成本减少6.4%。

(2) 与对照方案中的改进果蝇算法相比，研究

表8　自动检修与人工检修日期对比

Tab.8　Date comparison between automatic maintenance and manual maintenance

车底	月修后里程/km	自动检修日期	人工检修日期	日期差	检修间隔里程/km
10	2 330.0	2023-04-04	2023-02-22	42	19 848.5
22	5 967.5	2023-03-04	2023-02-09	25	20 231.5
27	3 818.5	2023-03-07	2023-02-20	17	20 752.5
3	20 190.2	2023-02-06	2023-02-24	18	20 190.2
20	16 740.0	2023-03-14	2023-03-30	16	20 180.5
21	16 291.5	2023-02-21	2023-03-29	38	20 207.0
25	20 676.0	2023-02-07/2023-03-16	2023-03-09	—	21 156.5/19 609.5
28	16 161.5	2023-03-04	2023-03-15	11	20 600.5
31	20 082.0	2023-02-09/2023-03-17	2023-02-19	—	20 687.5/19 697.5

注："/"表示存在2次编制。

方案采用的混合果蝇-遗传算法在同等条件下求解指派适应值时的收敛性更好。

（3）在检修安排方面，与人工编制方案相比，自动检修方案给出的检修日期更合理。一方面使车底的行驶里程尽可能接近定修标准里程再进行检修，避免车辆过早检修导致的检修资源浪费；另一方面确保行驶里程达到定修标准的车底应修尽修，避免车辆在运行过程中存在因不及时检修而致的安全隐患。

参考文献：

[1] 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.

[2] WANG D，D'ARIANO A，ZHAO J，et al. Joint Rolling Stock Rotation Planning and Depot Deadhead Scheduling in Complicated Urban Rail Transit Lines[J]. European Journal of Operational Research，2024，314(2)：665-684.

[3] 严　硕. 考虑改进检修模式的城市轨道交通车辆运用优化研究[D]. 南京：南京理工大学，2023.

[4] 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 of Train Operation Plans for Subway Based on Improved Drosophila Algorithm[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(9)：195-207.

[5] 王忠凯，史天运，张惟皎，等. 动车组运用计划和检修计划一体化编制模型及算法[J]. 中国铁道科学，2012，33(3)：102-108.
WANG Zhongkai，SHI Tianyun，ZHANG Weijiao，et al. Model and Algorithm for the Integrative Scheduling of EMU Utilization Plan and Maintenance Plan[J]. China Railway Science，2012，33(3)：102-108.

[6] 陈　然，周磊山，乐逸祥，等. 基于专家系统的网络化动车组运用计划的编制[J]. 中国铁道科学，2016，37(1)：108-116.
CHEN Ran，ZHOU Leishan，LE Yixiang，et al. Network EMU Scheduling Based on Expert System[J]. China Railway Science，2016，37(1)：108-116.

[7] HONG S P，KIM K M，LEE K，et al. A Pragmatic Algorithm for the Train-Set Routing：The Case of Korea High Speed Railway[J]. Omega，2009，37(3)：637-645.

[8] WANG D，ZHAN S G，PENG Q Y，et al. Integrated Overnight Train Scheduling and Maintenance Planning for High Speed Railway Lines[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2021，2675(3)：222-237.

[9] LIN B L，SHEN Y M，WANG Z K，et al. An Iterative Improvement Approach for High Speed Train Maintenance Scheduling[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2023，173：292-312.

[10] 陈旻瑜，张雨洁，张守帅，等. 基于车底使用数量最少的动车组运用计划优化研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(8)：52-57.
CHEN Minyu，ZHANG Yujie，ZHANG Shoushuai，et al. Operation Plan Optimization of Electric Multiple Units Based on the Minimum Number of Rolling Stock[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(8)：52-57.

[11] 魏国静，毛保华，王永亮. 城市轨道交通动车组运用计划编制方法研究[J]. 城市轨道交通研究，2013，16(6)：97-100.
WEI Guojing，MAO Baohua，WANG Yongliang. On Plan Compiling Methods of Urban Rail Transit Vehicle Scheduling[J]. Urban Mass Transit，2013，16(6)：97-100.

[12] LI J，LIN B L，WANG Z K，et al. A Pragmatic Optimization Method for Motor Train Set Assignment and Maintenance Scheduling Problem[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society，2016，2016(1)：4540503.

[13] 臧　瑶，徐　刚，黄　瑛，等. 基于均衡运用原则的列车运营日计划编配研究[J]. 城市轨道交通研究，2018，21(12)：24-29.
ZANG Yao，XU Gang，HUANG Ying，et al. Research on the Daily Schedule of Train Operation Based on Balanced Application Principle[J]. Urban Mass Transit，2018，21(12)：24-29.

[14] 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.

[15] 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.

[16] LIU Q, ZHAN M M, CHEKEM F O, et al. A Hybrid Fruit Fly Algorithm for Solving Flexible Job-Shop Scheduling to Reduce Manufacturing Carbon Footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 668-678.

[17] ZHANG H C, LYU S P, XIN D Q, et al. A Genetic Algorithm Enhanced with Neighborhood Structure for General Flexible Job Shop Scheduling with Parallel Batch Processing Machine[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 265: 125888.

[18] YUAN Y, XU H, YANG J D. A Hybrid Harmony Search Algorithm for the Flexible Job Shop Scheduling Problem[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(7): 3259-3272.

(责任编辑　汪沁萱)

（上接第46页）

[32] 张　雷，杜　冬，杨　可. 无人机适航管理的本土化路径思考[J]. 中国民航飞行学院学报，2026，37(1)：49-53.
ZHANG Lei, DU Dong, YANG Ke. Thinking on Localization Path of UAV Airworthiness Management[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2026, 37(1): 49-53.

[33] 廖慧姣. 面向低空经济产业的无人机监管体系研究：基于美国经验的思考[J]. 中国流通经济，2025，39(2)：16-29.
LIAO Huijiao. Research on the UAV Regulatory Framework for the Low-Altitude Economy: Insights from U. S. Experience[J]. China Business and Market, 2025, 39(2): 16-29.

[34] 李　楠，侯云娇，祁　帅，等. 重载飞艇在空铁联运中的应用前景分析与展望[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：44-49，83.
LI Nan, HOU Yunjiao, QI Shuai, et al. Analysis and Prospect of Application of Heavy-Lift Airship in Air-Rail Intermodal Transport[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 44-49, 83.

[35] 王　琦，魏少伟，刘　瑞，等. 铁路无人机巡检管理平台设计与实现[J]. 铁道建筑，2025，65(4)：143-148.
WANG Qi, WEI Shaowei, LIU Rui, et al. Design and Implementation of Management Platform for UAV-Based Railway Inspection[J]. Railway Engineering, 2025, 65(4): 143-148.

(责任编辑　吴文娟)