文章编号：1003-1421(2026)11-0108-10
引用格式：何少祥，张锐骥，殷勇，等.考虑班次作业强度均衡的城轨乘务排班计划优化方法[J].铁道运输与经济，2026，48(11)：108-117.
HE Shaoxiang，ZHANG Ruiji，YIN Yong，et al. Optimization Method for Urban Rail Crew Scheduling Plan Considering Balanced Work Intensity of Shifts[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：108-117.

考虑班次作业强度均衡的城轨乘务排班计划优化方法

何少祥[1,2]，张锐骥[1,2]，殷　勇[1,2]，罗　霄[1]，王顺利[1,2]

(1.西南交通大学 宜宾研究院，四川 宜宾　644000；2.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756)

摘　要：在传统排班模式下，城市轨道交通乘务员的班次作业强度存在不均衡的情况，加剧了疲劳风险。为实现班次作业强度的均衡分配并提升员工满意度，综合考虑企业运营成本与乘务员工作权益，在满足排班约束的前提下，构建了以作业段总接续时间最短和班次作业强度均衡的双目标乘务排班优化模型，并设计了带有精英保留策略的改进遗传算法用于模型的求解。以宜宾智能轨道快运系统T1线进行案例分析，结果显示，所生成的工作班方案共包含43个班次，班次平均工作时间为396.45 min，平均作业时间为279.63 min，平均接续时间为116.82 min，验证了模型兼具降低运营成本与保障乘务员工作权益的双重有效性。

关键词：城市轨道交通；乘务排班；遗传算法；班次作业强度；智能轨道快运系统
中图分类号：U293　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250813001

Optimization Method for Urban Rail Crew Scheduling Plan Considering Balanced Work Intensity of Shifts

HE Shaoxiang[1,2]，ZHANG Ruiji[1,2]，YIN Yong[1,2]，LUO Xiao[1]，WANG Shunli[1,2]

(1. Yibin Research Institute, Southwest Jiaotong University, Yibin 644000, Sichuan, China; 2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Under the traditional shift scheduling model, there is an imbalance in the work intensity of urban rail transit crew members, which exacerbates the risk of fatigue. To achieve a balanced distribution of shift work intensity and enhance employee satisfaction, the operational costs of the enterprise and the work rights of crew members were comprehensively considered. Under the premise of meeting the shift scheduling constraints, a dual-objective crew scheduling optimization model was constructed, aiming to minimize the total connection time of work segments and balance the work intensity of shifts. An improved genetic algorithm with an elite retention strategy was also designed for solving the model. A case study was conducted on the Yibin Autonomous Rail Rapid Transit System T1 line. The results show that the generated work shift plan includes 43 shifts, with

收稿日期：2025-08-13
通信作者：殷勇(1975—)，男，湖北随州人，西南交通大学交通运输与物流学院副教授。
基金项目：宜宾市双城市校协议专项科研经费科技项目(YBSCXY2023020011，YBSCXY2024010007)

an average working time of 396.45 minutes per shift, an average operating time of 279.63 minutes, and an average connection time of 116.82 minutes, verifying the model's dual effectiveness in reducing operational costs and safeguarding the work rights of crew members.
Keywords: Urban Rail Transit; Crew Scheduling; Genetic Algorithm; Work Intensity of Shifts; Intelligent Rapid Rail Transit System

0　引言

乘务计划是城市轨道交通运营中的关键环节，其任务是科学安排乘务员值乘顺序与班次组合，确保列车运行安全、提升效率并控制人力成本。随着网络规模扩大和人工成本上升，如何在满足复杂规则的前提下制定高效方案成为重要课题，国内外研究者对此进行了广泛而深入的探索。

在问题维度上，研究内容涵盖单线、跨线、任务配对、班次生成、轮班一体化、便乘约束、进餐与备班安排等。金华等[1]在模型中加入班次数比例与备班约束，实现排班与轮班全局优化。Pan 等[2]在允许无人值守运营条件下，协同优化车辆与乘员调度并考虑进餐与事故因素。杨帆等[3]提出可变编组条件下的调整模型，以班次数和接续时间最小为目标，设计两阶段广度优先搜索方法。Fuentes 等[4]在目标函数中引入惩罚项以减少便乘次数。杨静等[5]研究多车场条件下的任务配对，在任务守恒前提下提高值乘效率。

在建模方面，集合覆盖、集合分割和网络流模型是常用框架，也有将问题转化为旅行商或多旅行商问题、构建 0-1 整数规划模型的研究。张增勇等[6]构建以惩罚费用最小化为目标的双层 0-1 规划模型。苏铭等[7]将班次生成转化为类旅行商问题，引入虚拟点与双路径表划分任务。Zhou 等[8]基于集合分割方法构建多层时空网络模型优化乘务路径。Zhao 等[9]建立整数线性规划模型同时优化任务分配与生成，邓连波等[10]构建以最小化乘务组数量和接续时间为目标的多目标优化模型。

在求解方法上，研究者们一般采用精确式算法或启发式算法。丰富等[11]结合遗传算法与双向匹配算法求解模型。Xu 等[12]针对跨线排班提出列生成算法，田志强等[13]考虑便乘位置限制，设计列生成算法并用双向标签算法求解子问题。马亮等[14]针对便乘条件下任务配对，结合约束传播与启发式回溯算法。薛锋等[15]将遗传算法与模拟退火结合，均衡接续时间与工作时间方差。

尽管乘务排班问题的研究已取得丰硕成果，但现有文献在优化目标设定上普遍忽略了乘务员班次作业强度的均衡性。因此，本研究在现有基础上，将班次作业强度均衡性纳入核心优化目标，构建了面向城轨的乘务排班优化模型，确保作业负荷公平分配，并设计带有精英保留策略的改进遗传算法进行求解。

1　问题描述与建模

1.1　问题描述

在城轨乘务排班问题中，运营部门通常选取若干个固定车站作为司机上下班或换乘作业的地点，称为值乘站。在运行线路上，相邻 2 个值乘站之间的区段被定义为一个乘务片段(以下简称“片段”)，即司机作业任务的基本单元。一般情况下，司机需在一个班次内值乘多个同一车底的连续片段后，方可进行休息等活动。将多个同一车底的连续片段定义为一个乘务作业段(以下简称“作业段”)。作业时间定义为乘务员驾驶、到发站整备、检查列车的时间，不包括驾驶员休息、用餐等闲暇时间。进一步按照一定要求对作业段进行组合，形成若干个班次，即一个完整的乘务工作班(以下简称“工作班”)。

制定乘务排班计划的步骤如下。

(1) 确定值乘站。通常设在车辆段、停车场或中间某站点。其中，车辆段和停车场多位于线路两端，而中间值乘站则依据乘务负荷进行合理布设。

(2) 片段划分。通过分析列车运行图，提取当日所有出乘车底的车次任务，构建车次链集合。以值乘站作为分割节点，对车次链进行划分，形成片段集合。

(3) 作业段生成。将同一车底中一个或连续多个片段组合形成作业段，即乘务员连续值乘的任务段。乘务员值乘完一个作业段后，方可进行休息、用餐等活动。

(4) 乘务工作班生成。按照相关要求，将各作

业段合理组合，形成完整的工作班方案，即一天内所有班次的排班计划。

在此基础上，进一步强调班次作业强度的均衡性要求，主要体现为不同乘务员之间劳动负荷与作业时长的合理分配，以避免出现个别人员长期处于高强度值乘状态，从而影响排班的公平性与运行安全。

乘务排班计划示意图如图1所示，以3个车底为例，共生成9个作业段，2个班次。



图1　乘务排班计划示意图

Fig.1　Crew scheduling plan

1.2　符号定义

模型基本概念符号定义如表1所示，模型参数定义如表2所示。

表1　模型基本概念符号定义

Tab.1　Basic concept symbol definitions of the model

符号	定义
F	片段集合，$f \in F$，i为片段索引，m为片段最大值
u	片段车底编号，由当日出乘列车车底号决定
t_i^s	片段起始时刻
t_i^e	片段终止时刻
d_i^s	片段起始站点
d_i^e	片段终止站点
S	作业段集合，$s \in S$，j为作业索引，n为作业段最大值
v	作业段车底编号，与其中片段车底编号一致
t_j^s	作业段起始时刻
t_j^e	作业段终止时刻
d_j^s	作业段起始站点
d_j^e	作业段终止站点
P	工作班集合，$p \in P$，k为班次索引，l为工作班次最大值
t_k^s	班次起始时刻
t_k^e	班次终止时刻

表2　模型参数定义

Tab.2　Model parameter definition

符号	定义
T_{zd}	作业段最大持续时间，min
T_{zx}	作业段最小持续时间，min
T_r	乘务员最小间休时间，min
$[T_{ls}, T_{le}]$	午餐时间段，T_{ls}表示午餐开始时刻，T_{le}表示午餐结束时刻
$[T_{ds}, T_{de}]$	晚餐时间段，T_{ds}表示晚餐开始时刻，T_{de}表示晚餐结束时刻
T_m	乘务员最小用餐时间，min
T_{wl}	乘务员一日最大工作时间，min
T_{hl}	乘务员一日最小作业时间，min
x_{ij}	作业段生成过程中的决策变量，$x_{ij}=1$表示第i个片段包含于第j个作业段中，反之，则为0
y_{jk}	工作班生成过程中的决策变量，$y_{jk}=1$表示第j个作业段包含于第k个工作班次中，反之，则为0

1.3　乘务作业段生成

在乘务计划的编制过程中，片段划分与作业段生成可以整合为一个步骤。首先，以值乘站作为分割站点，将列车运行图切分为片段。然后，将划分好的片段进行组合，以生成作业段。

作业段生成过程应满足以下约束。

（1）片段全覆盖于作业段约束。所有的片段必须包含于作业段，出现且仅出现一次。

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad i = 1, 2, \cdots, m \tag{1}$$

（2）作业段中相邻片段规则约束。

$$u_i = u_{i+1} \tag{2}$$

$$t_i^e = t_{i+1}^s \tag{3}$$

$$d_i^e = d_{i+1}^s \tag{4}$$

式(2)表示一个作业段中相邻的2个片段的车底编号保持一致；式(3)表示前一个片段的终止时刻与后一个片段的起始时刻保持一致；式(4)表示前一个片段的终止站点与后一个片段的起始站点保持一致。

（3）作业段时长约束。

$$T_{zx} \leqslant \sum_{i=1}^{m} [x_{ij}(t_i^e - t_i^s)] \leqslant T_{zd} \qquad j = 1, 2, \ldots, n \tag{5}$$

式(5)表示每个作业段的作业时长范围，明确了作业段的时长上下限。上限的设定旨在防止疲劳驾驶的发生，而下限则有助于提高值乘效率。作业段生成过程中，将采用保证作业段时长下限、以时长

上限优先的策略对片段进行组合。

1.4　乘务工作班生成

工作班生成是乘务排班中的关键环节，其核心任务在于基于已生成的作业段，采用合理的接续策略将作业段有效组合，形成完整的工作班方案。考虑乘务排班规则约束，以最小化作业段总接续时间及均衡各班次作业强度为目标，构建乘务排班计划双目标优化模型。该模型为SPP模型(集合分割模型)[16]，保证乘务工作班能够覆盖所有作业段，且每个作业段仅被覆盖一次。通常，一个班次由不同车底的作业段进行接续，乘务员在完成一个作业段任务后，可利用作业段之间的接续间隔进行必要的休息和用餐。

综合考虑城轨企业运营成本、乘务员工作权益，以作业段总接续时间最小、乘务员作业强度均衡为目标，可表示为

$$\min Z_1 = \sum_{k=1}^{l}\sum_{j=1}^{n} y_{jk}\,(t_{j+1}^{s} - t_j^{e}) \tag{6}$$

$$\min Z_2 = \frac{1}{l}\sum_{k=1}^{l}\left\{[\sum_{j=1}^{n} y_{jk}(t_j^{e} - t_j^{s})] - \bar{y}\right\}^2 \tag{7}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{l}\sum_{j=1}^{n}(t_j^{e} - t_j^{s}) \tag{8}$$

式(6)表示工作班的作业段总接续时间最小，式(7)表示工作班的作业时长方差最小，式(8)表示工作班的平均作业时长。

然后，引入权重w_1和权重w_2将双目标转换为单目标函数，可表示为

$$\min Z = \alpha w_1 \cdot Z_1 + w_2 \cdot Z_2 \tag{9}$$

式中：w_1与w_2之和为1，α为数量级调整系数，确保Z_1与Z_2数量级一致。

同时，作业段接续还需满足以下约束。

（1）作业段全覆盖于工作班约束。所有作业段必须包含于工作班，出现且仅出现一次。

$$\sum_{k=1}^{l} y_{jk} = 1 \qquad j = 1,\ 2,\ \ldots,\ n \tag{10}$$

（2）工作班中相邻作业段值乘站点约束。

$$d_j^{e} = d_{j+1}^{s} \tag{11}$$

式(11)表示在不考虑便乘因素的情况下，乘务员交接班的安排，即班次的前一个作业段的终止站点与后一个作业段的起始站点保持一致。通过这种作业段接续方式，可以保证乘务员在同一个值乘站进行交接班，提高值乘效率。

（3）工作班中的乘务员间休时间约束。

$$t_{j+1}^{s} - t_j^{e} \geqslant T_r \tag{12}$$

$$(t_j^{e},\ t_{j+1}^{s}) \cap (T_{ls},\ T_{le}) = \varnothing \tag{13}$$

$$(t_j^{e},\ t_{j+1}^{s}) \cap (T_{ds},\ T_{de}) = \varnothing \tag{14}$$

式(13)—(14)表示班次2个相邻作业段的接续时间段与午餐、晚餐用餐时间段相交为空集，此时2个相邻作业段的间隔时段只需满足乘务员必需的休息时间即可。

（4）工作班中的乘务员用餐时间。当班次的工作时段覆盖了用餐时段时，必须为乘务员安排用餐，且需要预留充足的时间。

$$t_{j+1}^{s} - t_j^{e} \geqslant T_m \tag{15}$$

$$(t_j^{e},\ t_{j+1}^{s}) \cap (T_{ls},\ T_{le}) \neq \varnothing \tag{16}$$

$$(t_j^{e},\ t_{j+1}^{s}) \cap (T_{ds},\ T_{de}) \neq \varnothing \tag{17}$$

（5）工作时间与作业时间约束。乘务员每日工作时长不得超过8 h。作业时间定义为乘务员驾驶、到发站整备、检查列车的时间，不包括驾驶员休息、用餐等闲暇时间。通常一个班次的值乘任务将由一个驾驶员完成，因此，可以直接约束班次的工作时间、作业时间。

$$t_k^{e} - t_k^{s} < T_{wl} \qquad k = 1,\ 2,\ \ldots,\ l \tag{18}$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{jk}\,(t_j^{e} - t_j^{s}) \geqslant T_{hl} \qquad k = 1,\ 2,\ \ldots,\ l \tag{19}$$

式(18)表示各班次的工作时间约束，式(19)表示各班次的作业时间约束。

2　算法设计

乘务排班问题约束较多、解空间复杂，采用精确式算法求解速度过慢，研究选择带有精英保留策略的遗传算法进行求解。

2.1　乘务作业段生成算法

作业段生成算法具体步骤如下。

步骤1：从列车运行图中提取当日所有值乘列车的车次链信息，构成车次链集合。

步骤2：选取一条车次链，以值乘站为分割节点，对其进行分割，获取该车底对应的片段。

步骤3：根据作业段生成的相关约束，按照时间从小到大的顺序，选取相邻的片段，以作业段时长上限为基准，组合形成作业段。

步骤4：检查此车次链形成的作业段是否满足

作业段的时长约束。若存在低于作业段最小时长的作业段，则需从相邻的作业段提取一个片段，此情况只存在于靠后的作业段。

步骤5：重复步骤2—4，直至所有车次链处理完成。

步骤6：将作业段按照车底顺序进行编号，以形成作业段集合S。

2.2　乘务工作班生成算法

鉴于乘务排班问题集合覆盖模型的特性，提出了一种适用于该模型的遗传算法求解思路。工作班生成算法具体实施流程如下。

（1）编码。将整个工作班视为单独的个体，即一个工作班拥有一条染色体，染色体上的一个基因对应一个作业段。染色体采用0–1编码形式，设定为一个$n \times l$的矩阵$(M_{n \times l})$，其中，n表示作业段的数量，l表示工作班中班次数量；该矩阵元素的决策变量为y_{jk}，$y_{jk}=1$时表示第j个作业段包含于第k个班次中，反之，则为0。

（2）初始化种群。初始化种群是指生成若干个初始可行的工作班。为了拓展搜索空间，当前阶段仅考虑作业段时空接续约束及班次作业时长约束。生成初始工作班方案具体步骤如下。

步骤1：设定参数种群规模为R，即生成R个初始工作班。

步骤2：从生成的作业段集合中，依据起始时刻的先后顺序，选择一个作业段作为当前班次的首个作业段。

步骤3：从剩余的作业段中随机选择一个符合时空接续约束的作业段。

步骤4：在每次选择作业段并接续到当前班次后，计算班次的累计作业时长。若超出班次最小作业时长T_{hl}限制，则终止当前班次的生成，并开始生成下一个班次。

步骤5：重复步骤2—4，直至生成一个完整的班次。

步骤6：重复步骤2—5操作，直至生成R个工作班。

（3）适应度计算。适应度函数定义为2个目标函数加权之和。

（4）选择。从整个种群中筛选出前O个优秀的个体参与到后续的进化过程。

（5）交叉。在编码部分中，明确指出个体代表一个工作班。若采用遗传算法中的双亲交叉操作，则无法确保交叉后生成的工作班满足作业段覆盖唯一性。本研究采用单亲交叉操作，继而采用交换和插入2种形式，交叉示意图如图2所示。①作业段交换，随机选择2个班次，考虑工作班生成约束，交换某两个作业段，形成新的个体。②作业段插入，将其中一个班次的某一个作业段插入到另一个班次中。

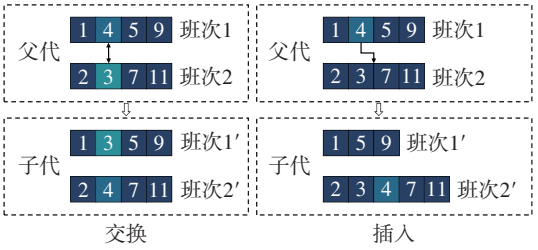


图2　交叉示意图
Fig.2　Crossover

（6）变异。随机选择一个班次的作业段进行突变，突变后的作业段应从满足时空接续约束的作业段集合中随机选取，变异示意图如图3所示。同时，由于作业段的唯一性约束，被选中的作业段原所在的班次也需进行相应的调整，类似交叉中的变换操作。变异后，需对这2个班次进行检查，以确保其满足工作班生成的约束。若不满足，则需重新进行变异操作。

（7）重插入。采用保留精英策略，从父代与子代中，选择适应度高的R个个体构成新的种群G'。

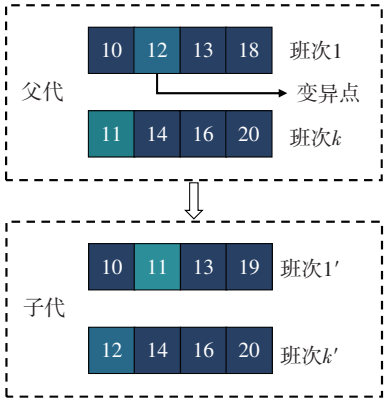


图3　变异示意图
Fig.3　Mutation

3　案例分析

3.1　实验数据

（1）线路概况。为验证算法的有效性，以宜宾智能轨道快运系统T1线为例，进行乘务排班计划的编制。该运营线路呈Y字型，包含一条支线。线路总长度为21.4 km，共设有21个站点，其中设有3个值乘站、1个车辆段及1个停车场，乘务员可在这5个站点进行交接班活动，分别用S_1~S_5表示，运行时间段为5:42:00—23:37:50，线路示意图如图4所示。

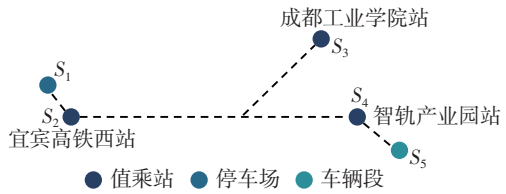


图4　线路示意图

Fig.4　Lines

（2）数据处理。对T1线某日的列车运行计划数据进行了清洗和整理，最终获得了14列列车的任务片段信息，包括车底号、车次号等信息。14列车底的编号为101—102，104—109，112—113，115—118，车底101部分片段信息如表3所示。

（3）参数设定。设定模型的相关参数，包括作业段时长区间、最小间休时间等，模型参数时间标准如表4所示，算法参数标准如表5所示。

3.2　排班结果分析

（1）灵敏度分析。不同权重组合下目标函数值变化情况如图5所示，其中横坐标表示目标作业段总接续时间的权重w_1变化。针对作业段总接续时间，随着权重w_1的增加，该目标函数值逐渐减小。这一变化符合预期，权重的增大意味着更侧重于这一优化目标。同时，随着w_1从0增加至1，权重w_2相应从1减少至0，工作班作业时长方差逐渐增加。这一结果反映了在权重调整过程中，2个目标函数之间的相互作用。综合考虑，选择[0.5，0.5]的权重组合，此权重设置不仅考虑了城轨系统的运营成本，也平衡了乘务员的作业强度。

表4　模型参数时间标准

Tab.4　Time standards for model parameters

参数	取值
作业段时长上下限[T_{zx}，T_{zd}]/min	[60，150]
最短休息时长T_r/min	25
午餐时间段(T_{ls}，T_{le})	11:00—13:30
晚餐时间段(T_{ds}，T_{de})	17:00—19:30
最短用餐时间T_m/min	30
工作时间上限T_{wl}/min	480
作业时间下限T_{hl}/min	200

表5　算法参数标准

Tab.5　Standards for algorithm parameters

参数	取值
种群规模R	80
选择进化个体O	70
交叉概率f_c	0.8
变异率f_m	0.1
迭代次数	1 000

表3　车底101部分片段信息

Tab.3　Partial fragment information of train set 101

编号	车底号	车次号	起始站点	终止站点	起始时刻	终止时刻
1	101	11201101	停车场	高铁宜宾西站	6:22:00	6:26:30
2	101	11201102	高铁宜宾西站	智轨产业园站	6:30:00	7:04:50
3	101	11201103	智轨产业园站	高铁宜宾西站	7:30:00	8:05:30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	101	11201109	智轨产业园站	高铁宜宾西站	13:30:00	14:05:30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	101	11201117	智轨产业园站	高铁宜宾西站	22:00:00	22:35:30
18	101	11201118	高铁宜宾西站	停车场	22:38:00	22:41:30

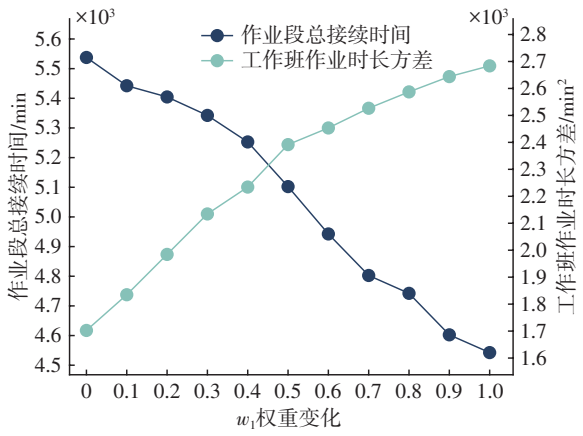


图5　不同权重组合下目标函数值变化情况

Fig.5　Changes of objective function with different combinations of weight

（2）乘务作业段生成方案。考虑乘务作业段生成模型的相关约束，依据2.1节的算法思路对所有车底的片段数据进行组合，生成作业段方案。车底101作业段如表6所示，作业段时长分布如图6所示，共计107个作业段，最大作业时长为149.833 min，最小作业时长为73.5 min，平均时长为112.38 min。

（3）乘务工作班方案。经过对算法的调试与优化，最终得到了包含43个班次的工作班方案，算法的收敛迭代图如图7所示。部分工作班方案如表7所示，其中，13–1表示第13列车底的第1作业段，其他编号依此类推。工作班方案图如图8所示，横坐标以当日0时为计时起点，按分钟进行计时。

表6　车底101作业段

Tab.6　Work segments of train car 101

编号	起始时刻	终止时刻	作业时长/min	起始站点	终止站点	车次链
1	6:22:00	8:05:30	103.50	1	2	11201101—11201103
2	8:20:00	10:49:50	149.83	2	4	11201104—11201106
3	11:30:00	13:04:50	94.83	4	4	11201107—11201108
4	13:30:00	15:04:50	94.83	4	4	11201109—11201110
5	15:45:00	17:34:50	109.83	4	4	11201111—11201112
6	17:50:00	20:05:30	135.50	4	2	11201113—11201115
7	20:45:00	22:41:30	116.50	2	1	11201116—11201118

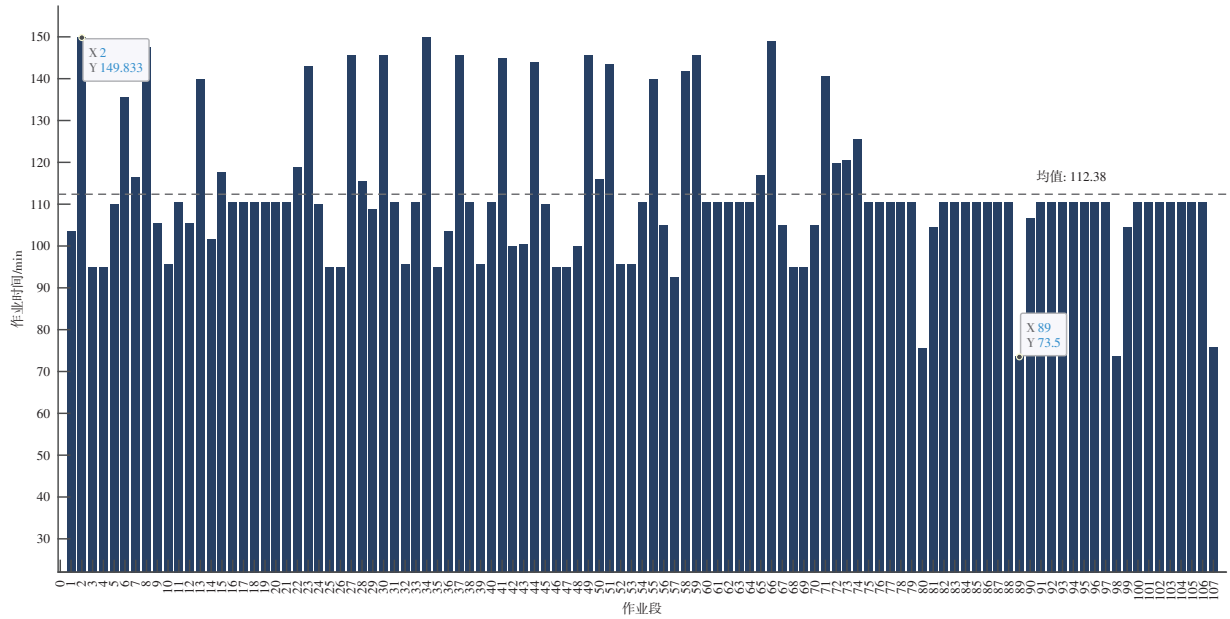


图6　作业段时长分布

Fig.6　Duration distribution of work segments

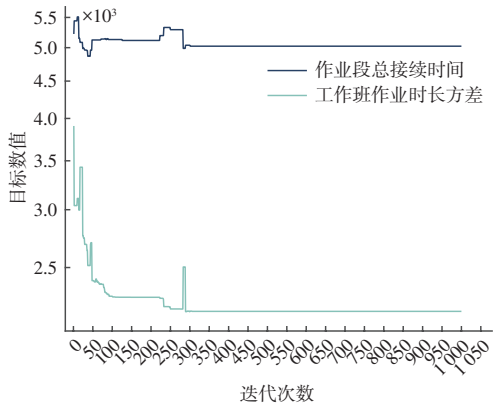


图7　收敛迭代图

Fig.7　Convergence iteration

表7　部分工作班方案

Tab.7　Partial work shift plans

编号	工作时间/min	作业时间/min	接续时间/min	包含的作业段
1	459.50	312.50	147.00	13–1，5–2，6–3
2	457.50	310.50	147.00	14–1，6–2，8–3
3	470.50	319.50	151.00	1–1，2–2，14–4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	329.83	244.67	85.17	1–2，4–3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
42	300.83	254.33	46.50	1–6，3–8
43	300.83	261.33	39.50	7–6，7–7

工作班方案工作时间、作业时间、接续时间分布如图9所示，各班次之间呈现出一定的时间差异。工作班方案平均工作时间达396.45 min，平均作业时间为279.63 min，平均接续时间为116.82 min。工作时间与作业时间的分配符合模型约束条件，进一步验证了生成算法的有效性。由于算法优先考虑工作时间和作业时间的约束，导致一些班次的接续时间较短，但仍能为乘务员提供必要的间休时间。

3.3　排班效果对比

为了验证研究提出的改进遗传算法的排班方案效果，基于相同数据集，将其与蚁群算法的排班结果进行比较，排班方案效果对比如表8所示。通过对排班方案的比较分析，研究提出的改进遗传算法相较于蚁群算法，班次数量、作业段接续时长和工作班作业时长方差实现了优化，优化幅度分别为4.44%，5.61%和9.62%，同时平均工作时长提升了2.66%。在作业段相同的情况下，减少班次数量和接续时间，并延长工作时长，有助于降低乘务员数量，降低企业的运营成本。此外，工作班作业时长的方差更小，班次作业时间就更加均衡。

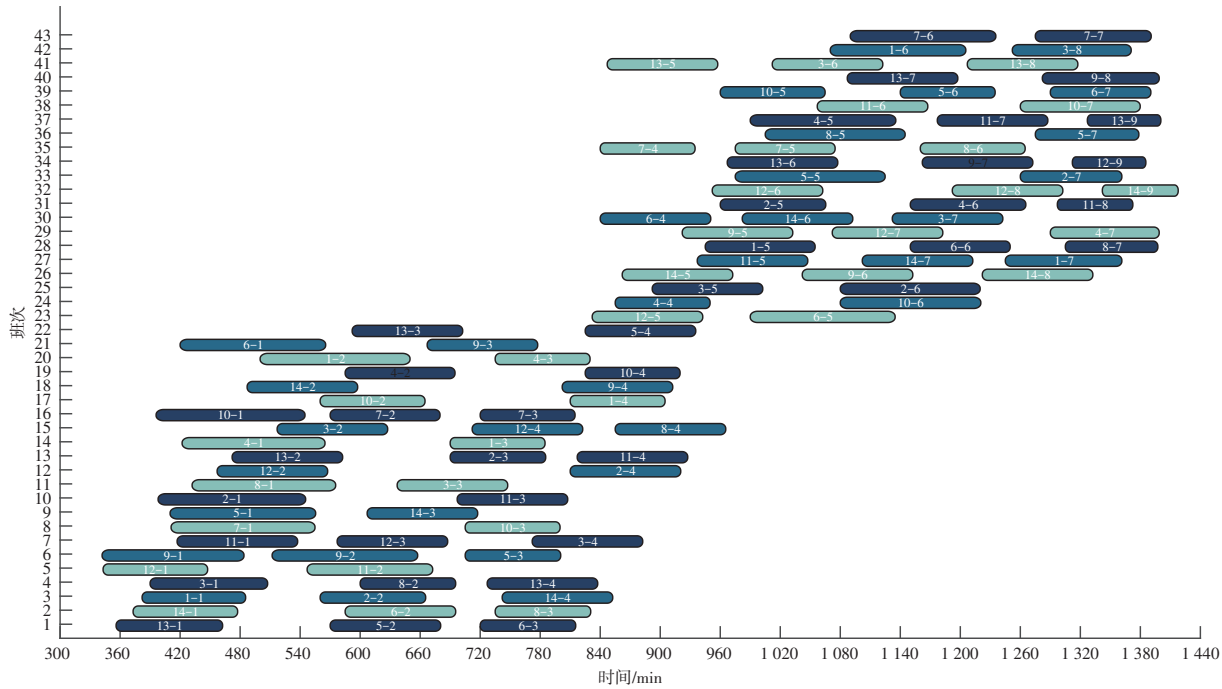


图8　工作班方案

Fig.8　Work shift plan

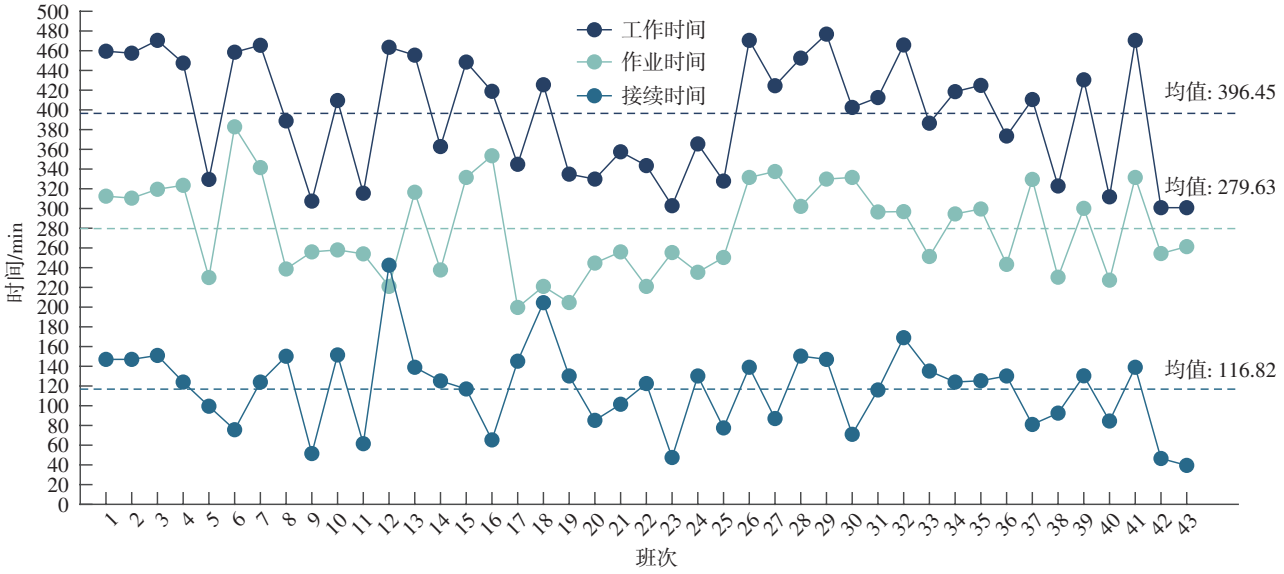


图9　工作班方案工作时间、作业时间、接续时间分布

Fig.9　Distribution of working time, operation time, and connection time in work shift plan

表8　排班方案效果对比

Tab.8　Comparison of scheduling effects

指标	改进遗传算法	蚁群算法
班次数量	43	45
作业段接续时长/min	5 023.33	5 321.67
工作班作业时长方差/min^2	2 177.33	2 409.11
平均工作时长/min	396.45	386.17

4　结束语

针对城轨乘务排班问题，提出了一种考虑乘务员作业强度均衡的优化模型，并使用改进型遗传算法进行模型求解。研究通过分析宜宾智能轨道快运系统T1线的实际数据，旨在解决排班计划中存在的作业强度不均衡、接续时间过长等问题，与蚁群算法排班方案对比，研究提出的改进遗传算法在班次数量、作业段接续时长以及工作班作业时长方差方面分别实现了4.44%，5.61%和9.62%的优化，同时平均工作时长提升了2.66%。该方法不仅降低了企业运营成本，同时有效保障了乘务员的权益。然而，在作业段生成阶段，所采用的切分车次链算法存在一定局限性，可能对后续作业班生成产生影响。未来研究可考虑将作业段生成与工作班生成2个步骤进行联动优化，以避免最优解的丢失。

参考文献：

[1] 金　华，陈绍宽，刘　爽，等. 基于固定班制的地铁乘务计划一体化优化方法[J]. 西南交通大学学报，2020，55(5)：955-962.
JIN Hua，CHEN Shaokuan，LIU Shuang，et al. Integrated Optimum Crew Planning in Fixed Shift System for Subways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2020，55(5)：955-962.

[2] PAN H C，LIU Z G，YANG L X，et al. A Column Generation-Based Approach for Integrated Vehicle and Crew Scheduling on a Single Metro Line with the Fully Automatic Operation System by Partial Supervision[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2021，152：102406.

[3] 杨　帆，陈绍宽，刘泽远，等. 面向列车可变编组的地铁乘务排班计划优化研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(7)：159-167.
YANG Fan，CHEN Shaokuan，LIU Zeyuan，et al. Optimization of Metro Crew Scheduling Plan Based on Variable Train Formation[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(7)：159-167.

[4] FUENTES M，CADARSO L，MARÍN Á. A Hybrid Model for Crew Scheduling in Rail Rapid Transit Networks[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2019，125：248-265.

[5] 杨　静，石俊刚，张玉清，等. 考虑多车场出退勤的城

轨交通乘务任务配对模型及算法[J]. 控制与决策，2024，39(7)：2142-2150.
YANG Jing，SHI Jungang，ZHANG Yuqing，et al. Optimization Model and Algorithm for Urban Rail Crew Pairing Problem with Multiple Depots[J]. Control and Decision，2024，39(7)：2142-2150.

[6] 张增勇，毛保华，杜　鹏，等. 基于惩罚费用的城市轨道交通乘务排班优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息，2014(2)：113-120.
ZHANG Zengyong，MAO Baohua，DU Peng，et al. Urban Rail Transit Crew Scheduling Model and Algorithm Based on Punishment Costs[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2014(2)：113-120.

[7] 苏　铭，刘兰芬，杨信丰，等. 基于TSP问题思想的城市轨道交通乘务排班计划研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(2)：131-138.
SU Ming，LIU Lanfen，YANG Xinfeng，et al. Research on TSP-Based Crew Scheduling Plan for Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(2)：131-138.

[8] ZHOU J，XU X M，LONG J C，et al. Metro Crew Planning with Day-off Pattern，Duty Type，and Rostering Scheme Considerations[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2022，143：103832.

[9] ZHAO M J，YANG S P，CAO D N，et al. A Synchronous Crew Scheduling Problem with Time Fairness Based on a Two-Phrase Assignment Strategy in an Urban Rail Transit Network[J]. Computers & Industrial Engineering，2025，205：111160.

[10] 邓连波，谢子若，甘书怀，等. 城市轨道交通乘务交路方案编制的禁忌搜索优化方法[J]. 北京交通大学学报，2024，48(4)：164-171.
DENG Lianbo，XIE Ziruo，GAN Shuhuai，et al. Optimization Method of Tabu Search Algorithm for Urban Rail Transit Crew Scheduling Scheme[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2024，48(4)：164-171.

[11] 丰　富，陈绍宽，杜　鹏. 考虑时间均衡度的城市轨道交通乘务排班计划优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息，2014，14(6)：164-170.
FENG Fu，CHEN Shaokuan，DU Peng. Time Equitability-Based Crew Scheduling Optimization for Urban Rail Transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2014，14(6)：164-170.

[12] XU Y F，YIN H D，YANG S，et al. Cross-Line Crew Scheduling Optimization in Urban Rail Transit Systems[J]. Computers & Industrial Engineering，2025，201：110896.

[13] 田志强，王付霞，连　惠，等. 限定便乘位置的城轨乘务排班计划编制方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(1)：133-145.
TIAN Zhiqiang，WANG Fuxia，LIAN Hui，et al. Urban Rail Crew Scheduling Plan Optimization Method with Limited Deadheading Position[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2025，25(1)：133-145.

[14] 马　亮，徐晓英. 考虑便乘的地铁乘务任务配对的约束优化模型研究[J]. 铁道学报，2021，43(3)：25-33.
MA Liang，XU Xiaoying. Research on Constraint Optimization Model for Metro Crew Pairing Problem with Passenger Tasks[J]. Journal of the China Railway Society，2021，43(3)：25-33.

[15] 薛　锋，肖　恩，杨　颖，等. 基于多旅行商问题建模的地铁乘务排班计划优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(2)：261-272.
XUE Feng，XIAO En，YANG Ying，et al. Optimization of Metro Crew Scheduling Plans Based on Traveling Salesman Problem Modeling[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2025，25(2)：261-272.

[16] 户佐安，周　姝，张宇昂. 城市轨道交通乘务计划优化编制研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版)，2025，55(2)：401-418.
HU Zuoan，ZHOU Shu，ZHANG Yuang. Review on Crew Planning Optimization for Urban Rail Transit[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2025，55(2)：401-418.

(责任编辑　汪沁萱)