

基于模拟退火算法的混合型铁路专用线取送车作业优化研究

赵明昊

浙江师范大学, 中国·浙江 金华 321000

摘要: 随着铁路货运量的不断提升, 混合型铁路专用线场景中取送车作业的组织难度日益增加。作为连接列车解编、货物装卸以及列车编组等环节的重要作业内容, 取送车作业计划的科学性对车站整体运行效率具有显著影响。以调机执行取送车任务的总作业时间最小化为目标函数建立数学模型, 同时综合考虑任务释放时间、最迟编组时限、正线时间窗等约束, 构建了混合型铁路专用线取送车作业优化模型。鉴于该问题具有组合规模大、约束关系复杂等特点, 采用模拟退火算法进行求解, 并以模型车站进行验证分析。研究结果表明, 所提出的方法能够在满足各项约束条件的前提下生成可行的作业计划, 可为混合型铁路专用线取送车作业的优化编制提供参考。

关键词: 混合型铁路专用线; 取送车作业; 模拟退火算法; 时间窗; 调机作业时长

Research on the Optimization of Mixed Railway Dedicated Line Shunting Operations Based on Simulated Annealing Algorithm

Zhao Minghao

Zhejiang Normal University, China Zhejiang Jinhua 321000

Abstract: With the continuous increase in railway freight volume, the organization of pickup and delivery operations in mixed railway dedicated line scenarios has become increasingly difficult. As an important task connecting train breaking, cargo handling, and train assembling, the scientific planning of pickup and delivery operations has a significant impact on the overall operational efficiency of the station. A mathematical model is established with the objective of minimizing the total operation time for locomotives performing pickup and delivery tasks, while comprehensively considering constraints such as task release time, latest assembling deadlines, and mainline time windows, to construct an optimization model for pickup and delivery operations on mixed railway dedicated lines. Given the large combinatorial scale and complex constraint relationships of this problem, the simulated annealing algorithm is used for solving, and validation and analysis are conducted using a model station. The results show that the proposed method can generate feasible operation plans while satisfying various constraints, providing a reference for optimizing the planning of pickup and delivery operations on mixed railway dedicated lines.

Keywords: Mixed railway dedicated line; Pickup and delivery operations; Simulated annealing algorithm; Time windows; Locomotive operation duration

0 引言

近年来, 随着铁路货运规模不断扩大, 铁路专用线逐步向港口、产业园区及工矿企业等区域延伸, 车站与专用线之间的作业联系愈加紧密^[1], 相关组织问题也随之变得更加复杂。在这一背景下, 取送车作业作为贯穿车辆解编、装卸作业以及后续列车编组的关键环节^[2], 其作业计划的合理程度直接关系到调机运用效率。在实际生产中, 调机通常需要在车站与多个作业点之间频繁往返执行任务^[3]。当作业顺序安排不当或任务批次划分不合理时, 容易导致走行路径重复、等待时间增加以及作业衔接效率下降等问题, 从而制约整体作业效率的提升^[4-5]。因此, 针对铁路专用线环境下取送车作业过程进行系统优化, 具有重要的工

程应用价值。

车站布局主要可分为树枝形、放射形和混合型三种形式。目前相关研究多集中于前两类结构, 在模型构建与算法设计方面取得了一定进展^[6-7]。混合型铁路专用线在调机执行任务时不仅需要考虑作业点之间的走行时长, 还需满足正线通行时间、列车编组时限等多种约束条件^[8-9], 其问题复杂度显著提升, 该类型场景下的取送车作业优化问题仍有待进一步深入研究^[10]。基于此, 本文以混合型铁路专用线为研究背景, 将取送车作业优化问题作为研究核心, 以降低调机作业时长为目标, 构建数学模型。在求解方法上, 考虑到问题规模较大且约束关系复杂, 采用模拟退火算法进行求解。通过模型车站对数学模型与算法进行验证

分析,为复杂专用线条件下取送车作业方案的制定提供理论支持与方法参考。

1 问题描述及模型建立

1.1 问题描述

在作业计划制定阶段,车站通常已明确需完成的取送车任务、编组时限和正线时间窗等信息。调机需依据既定计划,将待送车辆由车站送至对应的货物作业点,并在装卸作业结束后,将待取车辆牵引返回车站以参与后续编组作业。由于各项任务在作业属性、空间位置及时间约束等方面存在差异,调机作业计划编制中需要综合考虑多个问题,包括任务执行顺序的确定、作业批次的合理划分、有效衔接以及等待时间的控制等。

针对上述问题,本文将混合型铁路专用线取送车作业优化问题表述为:在给定计划周期内,基于已知的任务集合及其时间约束条件,通过优化调机的任务执行顺序与作业批次组织方式,使取送车作业总耗时最小。同时,所生成的作业方案需满足最晚编组时限、正线时间窗等约束。

1.2 条件假设

为建立数学模型,作如下条件假设:

(1) 计划阶段内需要完成的取送车任务已知,各任务对应的作业点、任务性质及时间均已给定。

(2) 前往相同货物作业点,且作业属性一致的车辆视为同一作业任务。

(3) 调机在同一作业批次内对同一货物作业点最多访问一次。

(4) 调机完成送车作业后立即离开作业点,不在作业点等待装卸完成。

1.3 参数与变量

1.3.1 参数

M : 货物作业点数量。

i, j : 货物作业点或车站节点编号, $i, j \in \{0, 1, \dots, M\}$, 0 表示车站。

N : 计划阶段内的作业任务数量。

k, h : 作业任务编号, $k, h \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

P : 计划阶段内正线可穿越时间窗数量。

$[l_p, r_p]$: 第 p 个正线可穿越时间窗, 其中 $p \in \{0, 1, \dots, P\}$ 。

d_k : 任务 k 的作业性质, 当 $d_k=1$ 时表示送车, 当 $d_k=2$ 表示取车。

a_k : 任务 k 最早允许开始执行的时刻。

p_k : 任务 k 对应车辆的最晚编组时限。

S_k : 任务 k 对应的货物作业点编号。

q_k : 任务 k 所属作业点枝编号。

t_{ij} : 调机从节点 i 走行至节点 j 的时间。

x_{ij} : 调机从节点 i 走行至节点 j 时是否需要穿越正线, 若需要则取 1, 否则取 0。

t_c : 调机单次穿越正线所需时间。

1.3.2 中间变量

t_k : 任务 k 的实际执行时刻。

w_k : 任务 k 在执行前产生的等待时间。

1.3.3 决策变量

G : 解的任务批次划分集合, $G = \{G_1, G_2, \dots, G_g, \dots, G_{|G|}\}$, G_g 为第 g 个作业批次的任务序列, $g \in \{1, 2, \dots, |G|\}$ 进一步记 $G_g = (k_{g1}, k_{g2}, \dots, k_{g|G_g|})$, k_{gm} 表示第 g 个作业批次中的第 m 个任务。

1.4 优化目标

本文以计划阶段内调机取送车作业总时长最小为优化目标。调机取送车作业总时长主要由调机走行时间和任务等待时间两部分组成, 因此目标函数可表示为

$$\min Z = T_1 + T_2 \quad (1)$$

其中, T_1 表示调机总走行时间, T_2 表示总等待时间。总等待时间可写为

$$T_2 = \sum_{k=1}^N w_k \quad (2)$$

若第 g 个作业批次的任务序列为 $(k_{g1}, k_{g2}, \dots, k_{g|G_g|})$, 则该批次的走行时间包括车站至首任务作业点、批次内相邻任务作业点之间, 以及末任务完成后返回车站的走行时间。调机总走行时间可表示为

$$T_1 = \sum_{g=1}^{|G|} \left(t_{0, S_{k_{g1}}} + \sum_{m=1}^{|G_g|-1} t_{S_{k_{gm}}, S_{k_{g,m+1}}} + t_{S_{k_{g|G_g|}}, 0} \right) \quad (3)$$

1.5 约束条件

结合混合型铁路专用线取送车作业的实际组织特点, 模型主要考虑以下约束。

(1) 同批次任务同作业点枝约束。

由于跨点枝作业通常需要返回车站后重新组织, 因此同一作业批次中的任务应属于同一作业点枝。即对于任意 G_g 中的相邻任务 k_{gm} 和 $k_{g,m+1}$, 有

$$q_{k_{gm}} = q_{k_{g,m+1}}, \quad \forall g, \forall m = 1, 2, \dots, |G_g| - 1 \quad (4)$$

(2) 任务时序衔接约束。

在同一作业批次内, 后续任务的执行时刻不得早于前一任务完成时间, 即

$$t_{k_{g,m+1}} \geq t_{k_{gm}} + t_{S_{k_{gm}}, S_{k_{g,m+1}}}, \quad \forall g, \forall m = 1, 2, \dots, |G_g| - 1 \quad (5)$$

任务等待时间由实际执行时刻与最早允许开始执行时

刻之间的差值确定, 因此有

$$w_k = t_k - a_k, \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

(3) 最晚编组时限约束。

对于取车任务, 其完成时刻不得晚于最晚编组时限, 即

$$t_k \leq p_k, \quad \forall k = 1, 2, \dots, N, d_k = 2 \quad (7)$$

(4) 先送后取约束。

在同一作业批次内, 应优先完成送车任务, 再执行取车任务。即

$$d_{k_{gm}} \leq d_{k_{g,m+1}}, \quad \forall g, \forall m = 1, 2, \dots, |G_g| - 1 \quad (8)$$

该约束保证了同一批次中的任务执行顺序符合“先送后取”的实际作业逻辑。

(5) 正线可穿越时间窗约束。

当调机在执行任务过程中需要穿越正线时, 其开始穿越时刻应位于某一可用时间窗内, 并能够在该时间窗内完成穿越。即若 $x_{ij} = 1$, 则存在某个时间窗 $[l_p, r_p]$, 满足

$$l_p \leq t_k \leq r_p - t_c, \quad \exists p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (9)$$

2 算法设计与算例验证

混合型铁路专用线取送车作业优化问题属于典型的组合优化问题, 具有任务数量多、约束关系复杂、可行解空间较大的特点。随着任务规模增加, 传统精确算法在求解效率方面往往受到较大限制, 而简单启发式方法又容易陷入局部最优, 难以获得较好的作业方案。针对上述特点, 本文采用模拟退火算法对所建模型进行求解。在模拟退火算法中, 首先给定一个初始解, 并计算其目标函数值。随后在当前解附近通过邻域扰动生成新解。若新解优于当前解, 则直接接受; 若新解劣于当前解, 则按照一定概率接受该新解。该概率通常由 Metropolis 准则确定, 即当温度较高时, 算法更容易接受较差解, 从而增强跳出局部最优的能力; 随着温度逐步降低, 接受较差解的概率不断减小, 算法搜索逐渐稳定, 并最终收敛到较优解附近。对于本文研究的混合型铁路专用线取送车作业优化问题, 可将任务执行顺序视为解的表示形式。在给定任务序列的基础上, 进一步进行批次划分即可得到作业方案。针对本文问题, 模拟退火算法的主要步骤如下。

(1) 初始化参数。设定温度 T_0 , 终止温度 T_{min} , 降温系数 α , 马尔科夫链 L , 随机生成初始任务序列。

(2) 生成初始解。根据初始任务序列形成作业批次划分方案, 计算调机取送车作业总时长, 作为当前解的目标函数值。

(3) 构造邻域解。在当前任务序列中随机选取两个位置进行交换, 生成邻域解, 并重新进行批次划分与目标函数计算。

(4) 接受准则判断。若邻域解优于当前解, 则直接接受; 若邻域解劣于当前解, 则根据 Metropolis 准则以一定概率接受该邻域解。

(5) 温度更新。在当前温度下重复执行邻域搜索达到设定迭代次数后, 按降温系数更新温度。

(6) 终止判断。当温度低于终止温度时结束算法, 输出最优任务序列及对应的作业批次划分方案; 否则返回步骤 (3) 继续搜索。

为验证所建模型与算法的有效性, 本文建立一个具有混合型铁路专用线布局特征的模型车站作为研究对象。站内设置一台调机负责取送车作业, 车站到发线与货物作业点枝分布于正线两侧, 能够较好反映混合型铁路专用线场景下调机取送车作业在路径衔接、任务排序和时间约束等方面的组织特点, 模型车站具体布局如下图 1。

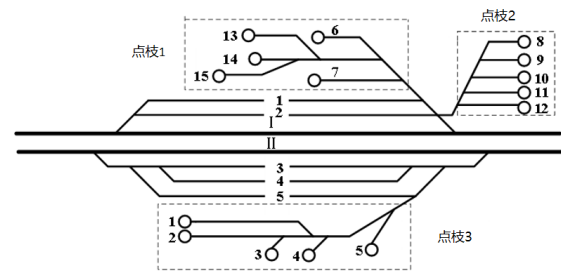


图 1 模型车站布局

调机在车站及各作业点间走行时间如下表 1 所示。

计划阶段内的作业任务如下表 2 所示。

计划阶段内可用的穿越正线作业时间窗为[8:00, 8:20], [8:35, 9:00], [9:15, 9:35], [9:50, 10:20], [10:35, 10:55], [11:10, 11:40], [12:00, 12:30], [13:20, 13:40]。模拟退火参数如下: 温度 $T_0=1\ 000$, 终止温度 $T_{min}=0.1$, 退火系数 $\alpha=0.98$, 马尔科夫链 $L=100$ 。算法计算得到的调机作业方案, 其任务批次划分见表 3。

从表 3 中批次划分结果可以看出, 在给定任务顺序下, 算法将全部作业划分为 6 个作业批次。作业包含纯取车、纯送车、取送结合的作业批次, 该结果与混合型专用线作业组织规律相一致, 由于点枝与到发线约束的存在, 不同作业需求需通过批次保证批次内作业逻辑与批次间衔接。

从时间看, 调机总作业时长 365 min, 等待总时长为 28 min, 等待占比相对可控, 且未导致作业过程中出现不可执行或长时间停滞的情况, 表明所生成方案在时间窗等

表1 调机在车站及各作业点间的走行时间（ min ）

车站及 作业点	车站及作业点															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	15	18	16	18	13	15	19	14	11	10	19	19	23	14	20
1	15	0	7	9	8	6	16	19	19	13	17	26	25	29	22	29
2	18	7	0	8	9	10	16	19	20	15	19	27	26	30	25	31
3	16	9	8	0	13	12	12	15	16	11	16	24	22	27	21	28
4	18	8	9	13	0	9	21	24	23	17	21	31	30	34	28	34
5	13	6	10	12	9	0	17	20	19	14	17	26	25	29	22	29
6	15	16	16	12	21	17	0	7	8	8	10	16	13	17	14	19
7	19	19	19	15	24	20	7	0	9	11	11	13	11	14	13	17
8	14	19	20	16	23	19	8	9	0	9	7	13	12	16	9	16
9	11	13	15	11	17	14	8	11	9	0	8	17	15	19	11	19
10	10	17	19	16	21	17	10	11	7	8	0	13	13	17	7	17
11	19	26	27	24	31	26	16	13	13	17	13	0	7	8	7	7
12	19	25	26	22	30	25	13	11	12	15	13	7	0	8	9	8
13	23	29	30	27	34	29	17	14	16	19	17	8	8	0	11	7
14	14	22	25	21	28	22	14	13	9	11	7	7	9	11	0	9
15	20	29	31	28	34	29	19	17	16	19	17	7	8	7	9	0

表2 计划阶段内取送车作业任务

任务	类型	站点编号	所属点枝	到发线编号	可牵引时间	最晚编组时分
1	送车	12	3	1	8:15	—
2	送车	13	3	1	8:25	—
3	送车	6	2	2	8:35	—
4	取车	3	1	5	8:00	10:40
5	取车	8	2	3	8:20	11:00
6	送车	9	2	3	8:50	—
7	取车	14	3	4	9:00	12:00
8	送车	2	1	5	9:10	—
9	取车	7	2	2	8:00	11:20
10	取车	15	3	4	8:00	12:20
11	送车	10	2	1	9:30	—
12	取车	4	1	5	8:30	10:50
13	送车	11	3	2	9:50	—
14	取车	5	1	4	8:40	11:10
15	送车	1	1	4	10:00	—

表3 算法得到的任务批次划分（ min ）

批次序号	作业任务	作业模式	穿正次数	等待时长	开始时刻	结束时刻	调机作业时长
1	12; 14; 4	纯取	2	10	08:00	09:25	85
2	6; 5; 9	取送结合	2	12	09:25	10:45	80
3	10; 7	纯取	0	0	10:45	11:28	43
4	15; 8	纯送	1	0	11:28	12:00	32
5	13; 1; 2	纯送	2	6	12:00	13:30	90
6	3; 11	纯送	0	0	13:30	14:05	35
合计	—	—	7	28	08:00	14:05	365

多约束条件下仍具有良好的可行性。等待主要集中在少数批次中，且其来源以正线时间窗引起的顺延等待为主，早到等待占比很小，这说明调机到达与允许开始时刻之间的匹配较为合理，也表明时间窗等待被有效约束在较短范围内，能够满足现场对作业连续性与节奏稳定性的要求。这说明在当前批次安排能够有效协调跨线作业，保证了作业方案在执行层面的稳定性与可实施性，为混合型铁路专用线取送车作业提供了一种可靠的计算取送车作业计划的方法。

参考文献：

- [1] 范厚明，田攀俊，吕迎春等. 时变路网下考虑时空距离的同时配集货车车辆路径优化[J]. 系统管理学报，2022,31(01):16-26.
- [2] 唐春林，汪逸民，王文宪等. 基于蚁群和模拟退火算法的专用线动态取送车研究[J]. 铁道运输与经济，2015,37(02):75-80.
- [3] Florian J, Alena O, Kilian S. Shunting operations at flat yards: retrieving freight railcars from storage tracks[J]. OR Spectrum, 2017.
- [4] 郭垂江，雷定猷. 铁路车站取送车作业图论模型及算法分析[J]. 华东交通大学学报，2014,31(01):102-107.
- [5] 郭垂江，孙小月，陈韬等. 混合型货物作业点取送车作业优化通用模型及算法[J]. 中国铁道科学，2022, 43(03): 164-172.
- [6] 丛铭. 混合型专用线取送车优化研究[D]. 大连交通大学，2022.
- [7] 丛铭，宋瑞，何世伟等. 混合型专用线取送车作业方案编制优化研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025,22(04): 1519-1529.
- [8] 怡智航. 运输结构调整背景下铁路多调机取送车作业优化研究[D]. 西南交通大学，2023.
- [9] 户佐安，怡智航，张文豪等. 混合型铁路专用线网络多调机取送车作业优化[J]. 铁道科学与工程学报，2025,22(07):2973-2984.
- [10] Zhu H J, Dollevoet T, Huisman D. An exact and heuristic framework for rolling stock rescheduling with railway infrastructure availability constraints[J]. Transportation Research Part B, 2025,195103189-103189.