



引用格式: 王宇晴, 查伟雄, 万平. 列车运行调整与到发线运用的协同优化研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9797-9804.

Wang Yuqing, Zha Weixiong, Wan Ping. Coordinated optimization of train operation adjustment and arrival departure-track operation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9797-9804.

列车运行调整与到发线运用的协同优化研究

王宇晴¹, 查伟雄^{1, 2*}, 万平¹

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学交通运输与经济研究所, 南昌 330013)

摘 要 在列车运行的过程中, 受到各种不确定性因素的影响, 列车可能会偏离图定运行计划, 同时也会对车站的到发线运用造成干扰。针对列车运行调整与到发线运用协同的优化问题, 兼顾列车运行调整约束与到发线运用约束, 建立了多目标的整数规划模型, 并设计了适用于求解该模型的分层序列鸽群优化算法。算例分析表明, 模型对列车运行计划进行调整的同时, 还能得到满意的到发线运用方案, 并且分层序列鸽群优化算法可以快速求解列车加权总到发晚点最少和到发线占用总消耗最小的目标函数。

关键词 铁路运输; 列车运行调整; 到发线运用; 协同优化; 鸽群优化算法

中图分类号 U292. 4; 文献标志码 A

Coordinated Optimization of Train Operation Adjustment and Arrival Departure-track Operation

WANG Yu-qing¹, ZHA Wei-xiong^{1, 2*}, WAN Ping¹

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Institute of Transportation and Economics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

[Abstract] Affected by various uncertain factors during train operation, the train may deviate from the planned operation plan and interfere with the operation of station arrival departure track. Aiming at the optimization problem of cooperation between train operation adjustment and arrival departure track operation, taking into account the constraints of train operation adjustment and arrival departure track operation, a mixed integer linear optimization model was established, and the stratified sequencing pigeon-inspired optimization algorithm suitable for solving the model was designed. The example analysis shows that the model can not only adjust the train operation plan, but also obtain a satisfactory application scheme of arrival departure track, and the stratified sequencing pigeon-inspired optimization algorithm can quickly solve the objective function of minimizing the total weighted arrival departure delay and the occupation cost of arrival departure track.

[Keywords] railway transportation; train operation adjustment; arrival-departure track using; collaborative optimization; pigeon-inspired optimization algorithm

列车运行调整与到发线运用都是铁路行车调度指挥工作中的重点, 列车运行调整的主要目标是列车占用区间的次序和列车占用区间的时长, 同时需要调整列车的到发时刻等。到发线运用则是列车在车站具体占用进路和到发线的固定方案, 故列车运行调整的维度相对于到发线运用较高。同时这两者也是相辅相成的关系。仅针对列车运行调整的优化问题, 中外学者已有一定的研究成果, 但是同时考虑到发线运用方面的研究还是较少。

Zhu 等^[1]建立了能够对多个突发事件同时进行

优化的动态列车运行调整模型, 并通过算例验证其有效性。Hong 等^[2]建立了列车取消运行情况下的运行图与停站方案一体化调整模型, 通过能加停站次数, 将延误旅客运送至目的地。Zhang 等^[3]提出一种运行调整与线路应急维护的协同优化策略, 在解决线路应急维护的同时, 进行运行调整降低列车延误, 提升运行控制的鲁棒性。李晓娟等^[4]以各列车在各车站的总延误时间最小为目标, 设计了一种分阶段多叉树的算法来求解。户佐安等^[5]以乘客总旅行时间最小为目标建立了基于列车运行一体

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(52062014); 江西省自然科学基金(20212BAB202010)

第一作者: 王宇晴(1997—)男, 汉族, 江西吉安人, 硕士研究生。研究方向: 轨道交通系统优化。E-mail: 452206535@qq.com。

* 通信作者: 查伟雄(1963—)男, 汉族, 江西修水人, 博士, 教授。研究方向: 交通运输系统优化的建模分析及算法设计。E-mail: 1033723954@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

化调整方法的模型,并设计嵌套式遗传算法进行求解。高如虎等^[6]构建了基于 Time-Station-Track 网络的 0-1 整数规划模型,并设计拉格朗日松弛算法进行求解。牛晋才等^[7]以列车进入车站和驶离车站的总晚点时间最少为目标,并运用人工鱼群算法求解。徐陪娟等^[8]以到发线变更次数最少和列车晚点延误时间最短为目标,建立混合整数线性优化模型并设计两阶段近似算法进行求解。彭其渊等^[9-10]以加权总晚点时间与到发线使用费用之和最小为优化目标,建立了线性 0~1 规划模型并设计了算法进行求解。王艺楠等^[11]、李智等^[12]分别将满意度与智能化应用加入列车运行调整的模型中,并设计算法进行求解。

从以上研究中可以发现,大多数学者在建模过程中约束和目标都考虑得比较全面。但在考虑到到发线运用方面,大多只考虑了各站到发线的数量。在发生列车大面积的延误情况下,晚点列车占用到发线大多是依照调度人员的主观意识,在运输效率方面难以保证。在研究列车运行调整问题的同时,综合考虑到发线运用的协同优化问题非常有必要。

因此,现主要研究列车运行调整与到发线运用的协同优化问题。建模过程中,综合考虑宏观层面的列车流运行调整与微观层面车站的到发线运用调整,以列车的加权总到发晚点时间最少和到发线的占用总消耗最小为目标函数,并结合模型特点运用分层序列鸽群优化算法,以求得突发晚点情况下的列车运行调整计划时刻表和到发线运用变更情况,为铁路管理部门的临时调度情况提供决策借鉴。

1 问题描述

1.1 列车运行图描述

选用双线自动闭塞高速铁路的单一方向线路为研究对象,且假设列车仅在车站内发生晚点。为后续便于程序设计以及晚点情况的表达,将列车运行图的计划线分别用到达线与出发线表示,横轴表示时间,纵轴表示车站,列车运行线与到达线和出发线的交点即列车的到达时间与出发时间,同时将运行图分成以分钟为单位 1 440 个离散时间点的集合,如图 1 所示。

1.2 问题假设

在列车出现晚点情况后,调度员将列车运行调整与到发线运用结合,并根据故障信息,在短时间内及时的做出决策,是一项困难性较高的工作。在这个过程中需要考虑的方面比较多,如列车运行时的安全性、列车及车站设备的能力约束以及场站的各项调度规则等方面。为了简化建模过程中的不

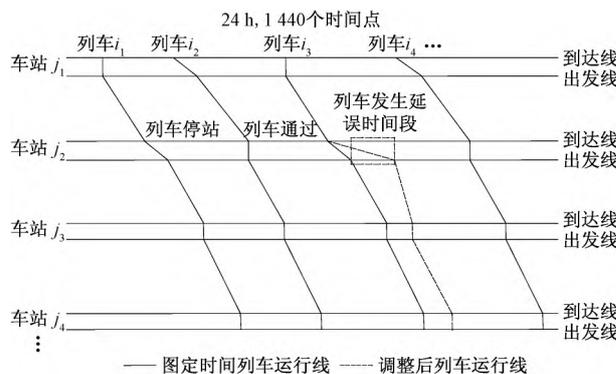


图 1 列车运行图表示

Fig. 1 Train operation diagram

必要因素,结合现场实际调度情况,做出如下假设。

- (1) 仅考虑列车在车站出发晚点的情况,不考虑线路区段内的突发情况导致的晚点。
- (2) 车站出现晚点的情况后,在列车出现晚点伊始,列车晚点具体时间并不确定。需要对接下来使用晚点列车所占用到发线的到发线运用方案进行调整。
- (3) 列车在车站的到发线运用,仅考虑停站通过的情况。
- (4) 列车正常运行情况下,都是严格按图行车。本文假定各列车在发生晚点前与恢复图定运行时间后,都严格按照运行图行车。

2 模型的建立

2.1 变量与符号说明

以某高速铁路下行方向为例,有如下变量定义。

- (1) 下行方向进入运行调整时间段的列车集合为 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m, \dots, i_M\}$ 。
- (2) 下行方向列车运行调整区段内,车站集合为 $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n, \dots, j_N\}$ 。
- (3) 在一些大型车站,一条到发线可能对应着多个接发车进路,所有车站对应的接车进路数量为 g_1, g_2, \dots, g_n ,发车进路数量为 h_1, h_2, \dots, h_n 。
车站 j_n 接车进路集合为 $JC_{j_n} = \{w_1, w_2, \dots, w_{g_n}\}$,发车进路集合为 $FC_{j_n} = \{r_1, r_2, \dots, r_{h_n}\}$ 。
- (4) n 个车站下行方向各站到发线数量为 k_1, k_2, \dots, k_n ,以 K_{j_n} 表示车站 j_n 到发线的集合,如第二个车站 $K_{j_2} = \{l_1, l_2, \dots, l_{k_2}\}$ 。

(5) 调整后列车 i_m 在车站 j_n 的到达出发时刻分别用 $T_{i_m j_n}^d$ 和 $T_{i_m j_n}^c$ 表示,调整前原图定到达出发时刻分别用 $T_{i_m j_n}^{d_0}$ 和 $T_{i_m j_n}^{c_0}$ 表示。

(6) 车站内接发车进路与到发线之间的逻辑关系采取 0~1 变量的方式,定义如下。

$$x_{i_m j_n l} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } i_m \text{ 在车站 } j_n \text{ 使用到发线 } l \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{i_m j_n l}^w = \begin{cases} 1, & \text{列车 } i_m \text{ 在车站 } j_n \text{ 选择与到发线 } l \\ & \text{衔接的接车进路 } w \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{i_m j_n l}^r = \begin{cases} 1, & \text{列车 } i_m \text{ 在车站 } j_n \text{ 选择与到发线 } l \\ & \text{衔接的发车进路 } r \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

(7) 列车优先等级用 $\eta(i_m)$ 表示, 值越大表示列车优先等级越高。不同等级列车所对应的权重为 $\varphi(i_m)$, 不等级列车相邻两站之间的最小运行时分用 $T_{i_m j_n - j_{n+1}}$ 表示, 列车的列车 i_m 在车站 j_n 最小作业时分用 $T_{i_m j_n}$ 表示, 相邻两列车的达到通过同一车站的最小间隔时间用 $T_{j_n - j_n}$ 表示。

(8) 最小到达、出发时间间隔分别用 T_d 和 T_c 表示, 列车的起、停附加时分别用 t_q 和 t_l 表示。

(9) 列车 i_m 通过车站 j_n 的作业类型用 $\beta_{i_m j_n}$ 表示。

$$\beta_{i_m j_n} = \begin{cases} 1, & \text{当 } T_{i_m j_n}^d - T_{i_m j_n}^c \neq 0 \text{ 列车停站通过} \\ 0, & \text{当 } T_{i_m j_n}^d - T_{i_m j_n}^c = 0 \text{ 列车不停站通过} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 约束条件

所建立的列车运行调整模型共有 10 组约束条件, 这些约束中 (1) ~ (6) 为列车运行计划相关的约束条件, (7) ~ (10) 为结合列车运行调整实际情况所提出的到发线运用约束条件。

(1) 同车站, 前后两列不同列车均满足最小到达、出发时间间隔。

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq T_d, \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (4)$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^c - T_{i_m j_n}^c \geq T_c, \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (5)$$

(2) 列车在相邻两站之间的运行时间, 必需满足列车最小运行时分, 并加上起停附加时分。

$$T_{i_m j_{n+1}}^d - T_{i_m j_n}^c \geq T_{i_m j_n - j_{n+1}} + t_q + t_l, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n, j_{n+1} \in J \quad (6)$$

(3) 列车若在某站停车, 作业时间不得小于该车站的最小作业时间:

$$T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^d \geq T_{i_m j_n}, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (7)$$

(4) 所有列车发车时间不得早于图定出发时分。

$$T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^{c_0} \geq 0, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (8)$$

(5) 相邻两列车到达通过同一站的最小间隔时间。

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq T_{j_n - j_n}, \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (9)$$

(6) 列车越行条件(后车 i_{m+1} 满足该条件, 才能越行前车 i_m):

$$\eta(i_{m+1}) > \eta(i_m) \quad (10)$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^d - T_{i_m j_n}^d \geq \beta_{i_m j_n} (T_d + t_l), \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (11)$$

$$T_{i_{m+1} j_n}^c - T_{i_m j_n}^c \geq \beta_{i_m j_n} (T_c + t_q), \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J \quad (12)$$

(7) 列车占用咽喉区接发车进路和到发线, 两者的唯一性约束。每列车在进站时, 只能占用一个接发车进路和一条到发线。

接发车进路唯一性:

$$\begin{cases} \sum_{w=1}^{g_n} y_{i_m j_n l}^w = 1 \\ \sum_{r=1}^{h_n} y_{i_m j_n l}^r = 1 \end{cases}, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (13)$$

到发线选择唯一性:

$$\sum_{l=1}^{k_{j_n}} x_{i_m j_n l} = 1, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J \quad (14)$$

(8) 到发线与接发车进路的选择确定:

$$x_{i_m j_n l} = \sum_{w=1}^{g_n} y_{i_m j_n l}^w = \sum_{r=1}^{h_n} y_{i_m j_n l}^r, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (15)$$

(9) 到发线被占用约束:

$$\sum_{T_{i_{m+1} j_n}^d \in [T_{i_m j_n}^d, T_{i_m j_n}^c]} x_{i_m j_n l} + x_{i_{m+1} j_n l} \leq 1, \quad \forall i_m, i_{m+1} \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (16)$$

(10) 到发线占用数量约束:

$$\sum_{i_m \in I} \sum_{j_n \in J} \sum_{l \in K_{j_n}} x_{i_m j_n l} \leq k_n, \quad \forall i_m \in I, \forall j_n \in J, \forall l \in K_{j_n} \quad (17)$$

2.3 目标函数

当列车偏离图定运行计划后, 不同速度等级列车晚点后的类型也有一定的差异, 并且调整措施也不相同。高等级列车相比于低等级的列车来说, 运行调整所产生的效益较大。同时用于评价运行调整目标的类型也较多, 本文使用的优化目标为总加权到发晚点时间最小, $\varphi(i_m)$ 为不同等级高速列车的权重, 目标函数为

$$\min Z_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{ \varphi(i_m) [(T_{i_m j_n}^d - T_{i_m j_n}^{d_0}) + (T_{i_m j_n}^c - T_{i_m j_n}^{c_0})] \} \quad (18)$$

在到发线运用方面, 应考虑到调整过程中对于

车站作业秩序的影响程度最小,即尽量少地去调整到发线运用方案。所以,到发线运用问题的最优化目标为列车占用到发线的总消耗最小,即尽量选择对车站作业秩序影响较小的到发线。由于列车在车站停站通过时,选用非原到发线运用方案后,车站内人员、设备、场站之间工作调整,存在一定的复杂性,表达目标函数时,对于不符合原到发线运用方案的列车占用到发线情况进行统一,采取仅考虑单一权重的方式。 $\omega_{i_m l}$ 为表示列车 i_m 占用到发线 l 的权重,取值为1和100。 $\omega_{i_m l}$ 取1时表示列车 i_m 在占用到发线 l 时符合到发线运用方案。当取值100时,表示列车 i_m 可以占用到发线 l ,但是不符合原到发线运用方案。在现场实际操作时,应当首选 $\omega_{i_m l} = 1$ 的到发线,但是在 $\omega_{i_m l} = 1$ 的到发线能力紧张的情况下,确保不产生多余的干扰,则可以视情形选用 $\omega_{i_m l} = 100$ 的到发线进行接发车。目标函数为

$$\min Z_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{k_j} [\omega_{i_m l} \varphi(i_m) x_{i_m j n l}] \quad (19)$$

上述两个目标函数所对应的函数值量纲不同,同时求解会十分困难,所以在鸽群优化算法的基础上,引入分层序列法,设计了一种适用于求解上述多目标不同量纲问题的分层序列鸽群优化算法,进行求解。

3 分层序列鸽群优化算法

3.1 算法介绍

由于多目标、多约束问题大多是求解难度较高的 NP-hard 问题,所以在求解该类问题时,对于算法的选择也是求解的关键一步。

分层序列法是解决两个或两个以上目标,不宜用加权合成为单目标问题进行求解的有效方法。仅需对不同的目标确定优先等级,并在求解时设定不同等级目标所对应的检验数集合 Q_n 。通过算法迭代,当所有检验数为非负时,进入下一层级目标的算法迭代。当所有目标的检验数集合均为非负时,即得到整体目标规划模型的满意解。

鸽群优化算法是通过模拟鸽子飞行过程中受地磁与地标影响的归巢习性,模拟设计出的一种较简易的群智能算法。该算法原理简洁明了,在设计过程中需要调节的参数较少,在编程时相对其他算法容易实现,同时鲁棒性也较强^[13-14]。鸽群优化算法中有两个基本部分,分别为:指南针算子、地标算子。当目的地距离鸽子较远时,它利用的是附近的地磁场来判别飞行方向。当目的地距离较近时,则用附近熟悉的地标来定位飞行。

指南针算子:鸽群前期在飞行的过程中,判断方向的依据主要来自地磁场,通过地磁场来不断的调整飞行方向。在函数优化问题方面,鸽群算法就是把每个可行解作为一个个体 i ,而每个个体都有其相应位置和速度,分别记为 $X_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{iD}]$ 和 $V_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{iD}]$,其中 $i \in \{1 \ 2 \ \dots \ N_p\}$, N_p 表示可行解数量,即产生初始解初始鸽群的数量; D 表示维度数。个体的位置与速度在 D 维解空间中每次都随着迭代而更新。在第 t 次迭代中,每个个体的位置 X_i 与速度 V_i 计算公式为

$$V_i(t) = V_i(t-1) e^{-Rt} + \text{rand} [X_g - X_i(t-1)] \quad (20)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (21)$$

式中: R 为指南针算子中的指南针因子; rand 为取 $0 \sim 1$ 的一个数值; X_g 为目前为止全局的最优位置,可以视作是指南针所指向的位置。

地标算子:当它们飞行逐渐靠近目的地后,会通过寻找附近熟悉的地标来导航,如果某个个体附近有熟悉的地标,则该个体就会径直飞向目的地,假如该个体附近没有熟悉的地标,它就会跟着熟悉地标的鸽子飞行达到目的地。在每次迭代过程中将鸽群数量 N_p 减半,选择适应度值较优的前一半作为当前种群,计算剩余鸽群的位置中心 X_c ,求解本文模型的地标算子为列车的图定运行时间与原到发线运用方案,将其作为参考方向,对每只鸽子的位置进行更新:

$$N_p(t) = \frac{N_p(t-1)}{2} \quad (22)$$

$$X_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} X_i(t) \times \text{fitness} [X_i(t)]}{N_p(t) \sum_{i=1}^{N_p} \text{fitness} [X_i(t)]} \quad (23)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + \text{rand} [X_c(t) - X_i(t-1)] \quad (24)$$

式中: fitness 为用来评价解质量的函数。鸽群优化算法在地标算子阶段的总体参考方向是那些相对较优个体的位置中心,因为该阶段没有个体自身的速度和惯性干扰,种群能够在很短的时间内快速收敛,并且得到最优值。当算法的迭代总次数达到了初始设定的最大值,地标算子停止运行,输出最优值。

上述模型有两个优化目标:总加权到发晚点时间最小、列车占用到发线的总消耗最小。直接用单一算法进行求解较为困难。所以将分层序列法引入鸽群优化算法中,用于求解模型。以总加权到发晚点时间最小为优先层级的求解目标,其检验数集

合为 Q_1 , 列车占用到发线的总消耗最小次之, 其检验数集合为 Q_2 。

3.2 分层序列鸽群优化算法步骤

求解列车运行调整与到发线运用协同优化模型的分层序列鸽群优化算法步骤如下。

步骤 1 参数输入, 图定列车到发时刻、列车数与车站数、列车等级权重、最小到达出发时间间隔、最小列车运行时分、起停附加时分、各站到发线数量以及占用费用、晚点情况假设等。

步骤 2 初始化种群数目 N_p 、解空间维度 D 、不同层级目标的检验数集合 Q_n 、指南针算子最大迭代次数 N_{c1} 、地标算子最大迭代次数 N_{c2} , 随机产生初始解的适应度函数值。

步骤 3 对列车运行调整目标进行计算, 鸽群中的每个个体寻优路径和速度进行设置。把每只鸽子的适应度值进行对比, 得到最好的飞行路径, 即对正点列车顺序进行保留, 对晚点列车及后续列车进行调整。

步骤 4 进入指南针算子操作。通过式(20)和式(21), 对每只鸽子速度与路径的更新。接着依据约束条件再对比鸽子的适应度值, 得到较优的列车运行调整方案。

步骤 5 当 $N_c > N_{c1max}$ 后, 指南针算子操作中, 进入到下一步操作。否则, 继续步骤 4。

步骤 6 进入地标算子操作。对已经得到的适应度值, 依据式(22)进行减半。接着依据式(23)找到留下来适应度值的中心, 即鸽子的理想目的地。将所有鸽子依据式(24)调整方向。最后, 存储该最佳目标函数与相应的列车到发时刻。

步骤 7 当 $N_c > N_{c2max}$ 后, 地标算子操作中, 输出计算结果。否则, 转到步骤 6。

步骤 8 验证列车运行调整目标的检验数集合 Q_1 。若均为非负, 则进入下一层级的目标计算。否则, 转到步骤 3。

步骤 9 对到发线运用目标进行计算, 鸽群中的每个个体寻优路径和速度进行设置。把每只鸽子的适应度值进行对比, 得到最好的飞行路径, 即对正点列车到发线运用方案进行保留, 对晚点列车及后续列车到发线运用方案进行调整。

步骤 10 进入指南针算子操作。通过式(20)和式(21), 对每只鸽子速度与路径的更新。接着依据约束条件再对比鸽子的适应度值, 得到较优的到发线运用方案。

步骤 11 当 $N_c > N_{c1max}$ 后, 指南针算子操作中, 进入到下一步操作。否则, 继续步骤 10。

步骤 12 进入地标算子操作。对已经得到的

适应度值, 依据式(22)进行减半。接着依据式(23)找到留下来适应度值的中心, 即鸽子的理想目的地。将所有鸽子依据式(24)调整方向。最后, 存储该最佳目标函数与相应的到发线运用调整情况。

步骤 13 当 $N_c > N_{c2max}$ 后, 地标算子操作中, 输出计算结果。否则, 转到步骤 12。

步骤 14 验证到发线运用目标的检验数集合 Q_2 。若均为非负, 输出所有层级目标的计算结果。否则, 转到步骤 9。

4 算例分析

为了验证模型与分层序列鸽群优化算法求解的有效性, 选取文献[15]中郑西高铁某区间段 13:00—19:00 的实际运行数据为仿真算例。已知数据如下: 下行方向列车数 11, 车站数 6, 将列车速度等级分为一级、二级、三级, 对应的列车权重 $\varphi(i_m)$ 为 3、2、1。11 列车的等级为 [1 1 1 1 3 3 3 3 2 2 2] 相应列车等级权重为 [3 3 3 3 1 1 1 1 2 2 2]。列车的起停附加时分为 2 min 和 1 min。各站到发线的数量分别为 3、3、3、2、2、3 条, 各站到发线集合为 K_1, K_2, \dots, K_6 , 且有 3 条到发线的车站中, 到发线 l_3 是占用权重为 100。

经过数次实验平台仿真分析后, 初始参数设置如下: 初始鸽群数量设置为 $N_0 = 30$, 地图和指南针算子最大迭代次数 $N_{c1} = 5$, 地标算子最大迭代次数 $N_{c2} = 15$, 地图与指南针因子 $R = 0.2$ 。为验证分层序列鸽群优化算法在求解上述模型时的有效性, 结合文献[15]中设定的三种不同的晚点情况, 并增加三种晚点情况都发生的情况进行模型求解分析。

三种假设晚点情况为: 车次 5 在车站 1 晚点 10 min、车次 9 在车站 1 晚点 15 min、车次 8 在车站 3 晚点 30 min。运行调整结果如表 1~表 5 所示, 加粗字体表示经过调整后的到发时刻。

从表 1 和表 5 中可知: 第一种晚点情况, 车次 5 在车站 1 晚点 10 min 后, 经调整, 列车在第 4 站恢复为图定运行时间, 同时造成车次 6 在第 1 站晚点 4 min、第 2 站晚点 1 min。到发线运用方面由于车次 5 在第 1 站发生晚点, 为车次 6 更换至车站 1 的到发线 2 办理接发车作业。最后得到目标函数值 Z_1 为 56, 总到发晚点时间为 56 min, 列车占用到发线总消耗 Z_2 不变。

第二种晚点情况, 车次 9 在车站 1 晚点 15 min, 算法调整结果以及到发线运用方案调整情况, 如上表 2 所示。从表 3 中可知, 第三种晚点情况, 车次 8

在车站3晚点30 min后经调整,车次9、10和11在车站3对车次8越行,只有车次8晚点,同时通过加快列车区间运行速度与压缩列车停站时分,总晚点时间为72 min,目标函数值 Z_1 为144。并且在第三种晚点情况下,鸽群优化算法要明显优于免疫蚁群算法,优化效果为81.4%。从表4中可知,三种晚点情况都发生的场景下,经调整后的总晚点时间为394 min,也较优于免疫蚁群算法的调整结果,优化效果为7.3%。从表5中可知,假设的4种晚点情况,在到发线运用调整方面,调整后得到列车占用到发线总消耗 Z_2 的值均为71,若现实中依据调度人员的主观判断调整该值则会无法确定,所以上述模型在实际生产调度方面具有一定的指导意义。

表1 第一种晚点情况算法调整后的列车运行时刻表
Table 1 Train timetable of the first delay case algorithm after adjusting

车站		车次		
		5	6	7
1	到	14:10	14:14	14:20
	发	14:17	14:21	14:28
2	到	14:53	14:57	15:06
	发	14:53	14:57	15:06
3	到	15:41	15:48	15:58
	发	15:41	15:48	15:58
4	到	16:34	16:44	16:54
	发	16:42	16:52	17:01
5	到	17:08	17:18	17:28
	发	17:16	17:26	17:36
6	到	18:02	18:12	18:22
	发	18:10	18:20	18:30

表4 三种晚点情况都发生算法调整后的列车运行时刻表
Table 4 Train timetable of three delay cases algorithm after adjusting

车站		车次										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	到	13:05	13:12	13:19	13:26	14:10	14:14	14:20	14:30	15:25	15:29	15:33
	发	13:11	13:18	13:25	13:32	14:17	14:21	14:28	14:38	15:31	15:35	15:39
2	到	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
	发	13:32	13:39	13:46	13:53	14:53	14:57	15:06	15:16	15:55	15:59	16:03
3	到	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:37	16:41	16:45	16:49
	发	13:58	14:05	14:12	14:19	15:41	15:48	15:58	16:53	16:41	16:45	16:49
4	到	14:28	14:35	14:42	14:49	16:34	16:44	16:54	17:33	17:19	17:23	17:27
	发	14:34	14:41	14:48	14:55	16:42	16:52	17:01	17:40	17:25	17:29	17:33
5	到	14:45	14:52	14:59	15:06	17:08	17:18	17:28	18:03	17:46	17:50	17:54
	发	14:45	14:52	14:59	15:06	17:16	17:26	17:36	18:08	17:46	17:50	17:54
6	到	15:11	15:18	15:25	15:32	18:02	18:12	18:22	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	15:17	15:26	15:31	15:38	18:10	18:20	18:30	19:02	18:35	18:42	18:50

表2 第二种晚点情况算法调整后的列车运行时刻表
Table 2 Train timetable of the second delay case algorithm after adjusting

车站		车次		
		9	10	11
1	到	15:25	15:29	15:33
	发	15:31	15:35	15:39
2	到	15:55	15:59	16:03
	发	15:55	15:59	16:03
3	到	16:25	16:29	16:37
	发	16:25	16:29	16:37
4	到	17:03	17:10	17:18
	发	17:09	17:16	17:24
5	到	17:36	17:42	17:50
	发	17:36	17:42	17:50
6	到	19:29	18:37	18:45
	发	18:35	18:42	18:50

表3 第三种晚点情况算法调整后的列车运行时刻表
Table 3 Train timetable of the third delay case algorithm after adjusting

车站		车次			
		8	9	10	11
1	到	14:30	15:10	15:20	15:30
	发	14:38	15:16	15:26	15:36
2	到	15:16	15:43	15:53	16:03
	发	15:16	15:43	15:53	16:03
3	到	16:41	16:17	16:27	16:37
	发	16:53	16:17	16:27	16:37
4	到	17:33	17:02	17:10	17:18
	发	17:40	17:08	17:16	17:24
5	到	18:03	17:36	17:42	17:50
	发	18:08	17:36	17:42	17:50
6	到	18:54	18:29	18:37	18:45
	发	19:02	18:35	18:42	18:50

表 5 不同晚点情况下到发线运用方案调整情况表

Table 5 Table of change of arrival and departure line operation scheme under different late conditions

晚点情况	晚点影响车次	到发线运用方案变更情况	原方案目标 Z_2	调整后 Z_2
第一种晚点情况	5、6	车次 6 在车站 1 到发线由 1 变更至 2	71	71
第二种晚点情况	9、10、11	车次 10 在车站 1 到发线由 1 变更至 2	71	71
第三种晚点情况	8	不变	71	71
三种情况都发生	5、6、8、9、10、11	车次 6 在车站 1 到发线由 1 变更至 2; 车次 10 在车站 1 到发线由 1 变更至 2	71	71

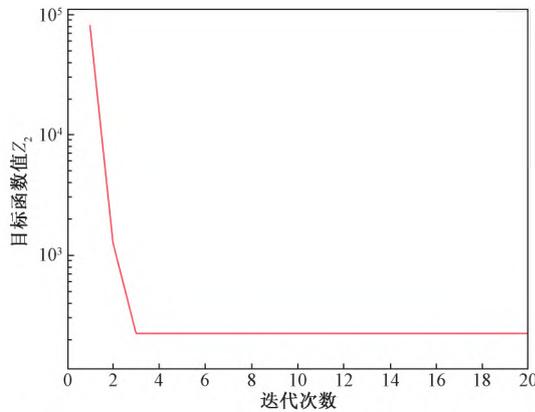


图 2 第二种晚点情况目标 Z_1 算法收敛曲线图

Fig. 2 Convergence curve of Z_1 algorithm in the second case of delay

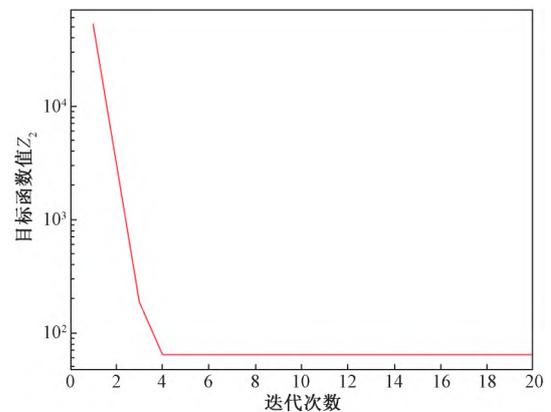


图 3 第二种晚点情况目标 Z_2 算法收敛曲线图

Fig. 3 Convergence curve of Z_2 algorithm in the second case of delay

表 6 不同晚点情况免疫蚁群算法与分层序列鸽群优化算法求解总到发晚点时间的结果对比

Table 6 The results of immune ant colony algorithm and SSPIO algorithm were compared under different delay conditions

晚点情况	初始晚点 总时间	免疫蚁群算法		分层序列鸽群优化算法			优化 效果 / %
		总晚点时间	迭代次数	总晚点时间	迭代次数	目标 Z_1	
第一种晚点情况	10	56	50	56	4	56	—
第二种晚点情况	15	107	50	107	4	214	—
第三种晚点情况	30	388	70	72	5	144	81.4
三种情况都发生	55	425	70	394	5	512	7.3

算法求解第二种晚点情况下,目标 Z_1 与 Z_2 的迭代图,如图 2 和图 3 所示。不同晚点情况免疫蚁群算法与分层序列鸽群优化算法求解总到发晚点时间的结果对比,如表 6 所示。从图 2 和表 6 可知,总到发晚点时间鸽群优化算法仅用 4 次左右迭代就得出结果。而文献 [15] 中免疫蚁群算法在求解总到发晚点时间时,需要迭代 50 次左右,所以鸽群优化算法在求解本文优化模型时,具有一定的优越性。

5 结论

建立了列车运行调整与到发线运用协同优化模型,以列车在各站的总加权晚点时间最少以及列车在各站占用到发线的总费用最小为目标,同时考虑列车运行调整约束和到发线运用约束。结合现有群体智能算法求解该类问题时,收敛速度较低、求解速度慢的缺点,在鸽群优化算法的基础上引入

分层序列法,对列车运行调整与到发线协同优化模型进行求解,得到的运行调整结果与免疫蚁群算法相比总是相同或者优于后者,算法迭代次数明显较少,并且还得到了满意的到发线运用调整方案,具有一定的实际参考价值。但是,模型考虑的仅为单方向条件下列车运行调整与到发线运用协同优化问题,下一步研究重点将是探究双线调度区段的列车运行调整与到发线运用协同优化问题。

参 考 文 献

[1] Zhu Y Q, Goverde R M P. Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 103080.
 [2] Hong X, Mengli Y, D'ariano A, et al. Integrated optimization of capacitated train rescheduling and passenger reassignment under disruptions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 103025.
 [3] Zhang H M, Li S K, Wang Y H, et al. Collaborative realtime opti-

- mization strategy for train Rescheduling and track emergency maintenance of high-speed railway: a lagrangian relaxation-based decomposition algorithm[J]. *Omega*, 2021, 102: 102371.
- [4] 李晓娟, 闫振英, 韩宝明. 基于多叉树的延误高速列车运行优化调整方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(2): 130-136.
Li Xiaojuan, Yan Zhenying, Han Baoming. An optimization adjustment method for delayed high-speed trains based on multi-tree[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(2): 130-136.
- [5] 户佐安, 夏一鸣, 蔡佳, 等. 延误条件下综合多种策略的城轨列车运行调整优化[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 1664-1672.
Hu Zuoan, Xia Yiming, Cai Jia, et al. Optimization of urban rail transit operation adjustment based on multiple strategies under delay[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(5): 1664-1672.
- [6] 高如虎, 牛惠民, 江雨星. 基于多维网络的增开列车条件下高速铁路列车运行图调整[J]. *铁道学报*, 2020, 42(5): 1-8.
Gao Ruhu, Niu Huimin, Jiang Yuxing. Train timetable rescheduling based on a time-station-track multi-dimensional network under condition of running extra trains for high-speed railway[J]. *Journal of Railways*, 2020, 42(5): 1-8.
- [7] 牛晋财, 李茂青, 张雁鹏. 基于人工鱼群算法的列车运行调整方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(7): 259-264, 270.
Niu Jincai, Li Maoqing, Zhang Yanpeng. Train operation adjustment based on artificial fish swarm algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(7): 259-264, 270.
- [8] 徐培娟, 张大伟, 彭辉, 等. 多类干扰下的高铁列车运行调整优化模型[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(7): 1723-1731.
Xu Peijuan, Zhang Dawei, Peng Hui, et al. Trains rescheduling for high-speed railway under the influence of multi-disturbances[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(7): 1723-1731.
- [9] 彭其渊, 张永祥, 鲁工圆, 等. 基于时空资源的铁路客运站到发线运用调整[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 1011-1021.
Peng Qiyuan, Zhang Yongxiang, Lu Gongyuan, et al. Arrival and departure tracks utilization adjustment method in railway passenger stations based on time-space resources[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(7): 1011-1021.
- [10] 彭其渊, 宁佳, 鲁工圆. 大型高铁客运站到发线运用调整模型及算法[J]. *铁道学报*, 2019, 41(1): 10-19.
Peng Qiyuan, Ning Jia, Lu Gongyuan. Model and algorithm for train platform scheme rescheduling at large high-speed railway station[J]. *Journal of Railways*, 2019, 41(1): 10-19.
- [11] 王艺楠, 田锐, 王义惠, 等. 基于满意度分析的高速铁路列车运行调整优化研究[J]. *铁道运输与经济*, 2021, 43(3): 1-7.
Wang Yinan, Tian Rui, Wang Yihui, et al. Research on train operation adjustment of high-speed railway based on satisfactory optimization[J]. *Railway Transport And Economy*, 2021, 43(3): 1-7.
- [12] 李智, 端嘉盈, 曾壹, 等. 基于智能化应用的列车运行调整模型[J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(2): 173-182.
Li Zhi, Duan Jiaying, Zeng Yi, et al. Train operation adjustment model based on intelligent application[J]. *China Railway Science*, 2021, 42(2): 173-182.
- [13] 范林飞. 基于鸽群算法的多无人机协同编队[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Fan Linfei. Cooperative formation of multi-UAVs based on pigeon algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [14] Hai X S, Wang Z L, Feng Q, et al. A novel adaptive pigeon-inspired optimization algorithm based on evolutionary game theory[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(3): 1-2.
- [15] 豆雯雯. 基于免疫蚁群算法的列车运行调整模型的优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
Dou Wenwen. Optimization research of train operation adjustment model based on immune ant colony algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012.