

基于可预知大客流的城市轨道交通列车 加开计划调整模型与算法^{*}

易志刚^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院研究生部, 100081, 北京;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京)

摘 要 [目的] 节假日、大型文体活动等事件会导致城市轨道交通线路产生可预知大客流, 需在确保列车运行安全的前提下, 根据客流预测情况在已有列车运行图中加开列车, 以期在运营成本、运营组织复杂度和乘客服务水平之间取得平衡。[方法] 采用事件-活动网络, 对列车运行过程进行了形式化描述, 建立了 3 个目标函数及相关的约束条件, 进而构建了独立运用策略下列车加开计划调整模型、套跑混合运用策略下列车加开计划调整模型。在此基础上, 提出了基于混合遗传禁忌的搜索算法。结合深圳地铁 11 号线的实际运营数据, 在高峰时段和非高峰时段分别建立了不同的算例场景, 以验证所建模型和算法的有效性。[结果及结论] 所建模型支持不同运营时段、不同运行交路、不同车底接续策略下列车加开需求, 在可预知大客流的运营调整上具有适用性。在车辆资源相对有限的情况下, 为有效缓解高峰时段的客流压力, 可灵活采用大小交路套跑混合运用策略, 使线路的运输能力最大化。

关键词 城市轨道交通; 可预知大客流; 列车加开; 列车运行计划调整

中图分类号 U292.4; U293.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.09.004

Plan Adjustment Model and Algorithm for Inserting Extra Trains in Urban Rail Transit Based on Predictable Large Passenger Flow

YI Zhigang^{1,2}

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, 100081, Beijing, China; 2. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China)

Abstract [Objective] Holidays, large-scale cultural and sports activities and other events will lead to large predictable passenger flow in urban rail transit. Under the premise of ensuring the train operation safety, extra trains should be inserted into the existing train operation plan according to the predicted

passenger flow so as to strike a balance between operation cost, operational organization complexity and passenger service level. [Method] The train operation process is formally described by using event-activity network. Three objective functions and related constraints are established, and then the train operation schedule adjustment models under independent operation and mixed running strategies are further constructed. On this basis, a search algorithm based on hybrid genetic taboo is proposed. According to the actual operation data of Shenzhen Metro Line 11, different scenarios for peak hours and off-peak hours are established respectively to verify the effectiveness of the proposed models and algorithm. [Result & Conclusion] The proposed models meet the demands of inserting extra trains into operation in different operation periods, routes, and connection strategies, and are applicable to the operation adjustment with predictable large passenger flow. Under the condition of relatively limited vehicle resources, the mixed running strategy can be flexibly adopted to effectively alleviate the passenger flow pressure during peak hours and maximize the transportation capacity of the line.

Key words urban rail transit; predictable large passenger flow; inserting extra trains into operation; train operation schedule adjustment

城市轨道交通通常根据历史客流数据进行客流预测并编制列车运行计划, 以规划未来 3~6 个月的行车组织。在规划时限内可能发生的大型活动 (如演唱会、体育赛事等), 这些活动会导致某一时间段内产生大客流, 其客流量与行车计划编制所依据的客流预测数据差异较大。因此, 需要基于这些可预知的大客流, 对列车运行计划进行调整, 以适应特殊的客流变化需求。

列车加开是城市轨道交通线路行车计划调整

^{*} 国家自然科学基金项目 (72288101, 72091513); 中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发计划项目 (2021 YJ100)

的主要手段。文献[1]对城市轨道交通线路计划编制阶段客流不均衡情况下的列车加开问题进行了研究。文献[2]提出了高峰时段高速铁路加开列车的优化方法。文献[3]通过调整停站、列车加开等措施,优化了京沪高铁线的运行计划。对于周期运行图的加线问题,文献[4-5]提出了分阶段构建模型,将加线问题转化为涉及运行图编制、调整及列车接续方案的综合优化问题。

现有研究主要聚焦于铁路计划编制阶段,而对城市轨道交通线路计划调整阶段列车加开问题的研究较为匮乏。尽管文献[6]对可预知大客流场景下开行临时客车的问题进行了研究,但未考虑计划调整后对列车运用计划的影响。在实际运营中,若没有足够的列车资源分配给每个运输任务,就可能导致计划调整方案不可行。为此,本文在已有运行图的基础上,考虑车底周转接续问题,根据客流需求变化进行列车加开计划调整,为调度员在计划调整阶段基于可预知大客流情况制定列车加开计划提供支持。

1 问题描述

在加开列车时,通常将加开列车与已有运行图列车分开,独立安排加开列车的车底运用接续,以便于管理。然而,这种方式可能会导致车辆运用效率较低。为此,考虑到城市轨道交通车辆资源紧张的现状,针对加开列车车底运用接续,本文提出了两种策略:加开列车车底独立运用策略(以下简称“独立运用策略”)、加开列车与已有运行图列车车底套跑混合运用策略(以下简称“套跑混合运用策略”)。图1为列车加开计划调整问题示意图。设 k 为列车车次, k_1-k_7 为运行图上计划开行列次的编号, k_{add} 为加开列次的编号。为了清楚地描述列车加开计划调整问题,分2种情况予以讨论:

1) 采用独立运用策略时,若车辆固定运用,车底周转接续方案为 $k_2-k_3-k_4-k_5-k_6-k_7-k_1-k_{add}$ 。若车辆不固定运用,车底周转接续方案为 $k_{add}-k_1-k_2-k_3-k_4-k_5-k_6-k_7$ 。

2) 采用套跑混合运用策略时,由于加开列次 k_{add} 与列次 k_1 间不满足最小折返时间要求,可以调整 k_{add} ,由此,车底接续方案为 $k_1-k_{add}-k_2-k_3-k_4-k_5-k_6-k_7$ 。若不调整 k_{add} ,则可采用 $k_{add}-k_2-k_3-k_1-k_4-k_5-k_6-k_7$ 的车底接续方案。

在可预知大客流场景下对列车加开计划调整

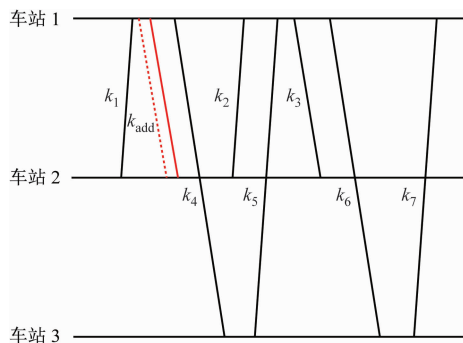


图1 列车加开计划调整问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of operation schedule adjustment for inserting extra trains into operation

问题进行研究,即:在大客流发生时,给定期望的加开列车数量,并考虑可用车底数量的限制,在指定时间窗口范围内选择合适时机,向已有运行图插入加开列车以增加线路运能;依据车底接续策略,对调整后的列车接续方案进行优化,使运营成本、乘客等待时间、运行图调整量等指标达到平衡。

结合实际情况,建模时设定线路上、下行列车分线运行,互不影响,且不考虑列车反向运行。假定大客流事件发生时的客流OD(起讫点)分布和持续时间已知,且所有可用列车均可完成当天的列车计划任务。

2 模型构建

2.1 列车运行过程的形式化描述

为便于研究,将列车运行过程描述为事件-活动网络,列车运行过程形式化描述如图2所示。事件-活动网络是由事件集 E 和活动集 A 构成的有向无环图,其中:事件集 E 一般包括到达事件 e_{ar} 和出发事件 e_{de} 两类。图2中, A_{dwell} 、 A_{pass} 、 A_{run} 、 A_{conn} 分别为列车停站、通过车站、区间运行、接续活动的集合; $A_{de,ar}$ 、 $A_{de,de}$ 、 $A_{ar,ar}$ 分别为列车发到、发发、到到活动的集合。

2.2 目标函数

从企业运营成本角度,选用加开列车需要的车底数量最小作为第一个目标函数 z_1 。 z_1 的计算式为:

$$z_1 = \sum_{d_x \in D_{dep}} \sum_{a \in A_{dep}} \sigma_{a,turn} \quad (1)$$

式中:

a ——事件-活动网络中的活动序号;

$\sigma_{a,turn}$ ——0-1 决策变量,其值取1时表示接续折返活动 a 被选择,取0时表示接续折返活动 a 未

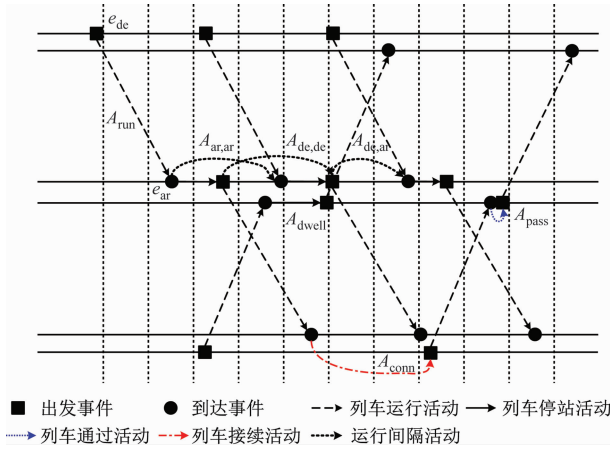


图2 列车运行过程形式化描述

Fig. 2 Formal description of train operation process

被选择;

d_x ——第 x 个停车场、车辆段或车站存车线;

D_{dep} ——停车场、车辆段或车站存车线的集合;

A_{dep} ——从 d_x 上线的始发列车在始发车站的车底接续活动集合。

从运营调度组织角度,选用与已有运行图的调整偏差最小作为第二个目标函数 z_2 。 z_2 等于已有运行图中所有事件(到达事件和出发事件)的调整后时间减去调整前时间的差值之和,其计算式为:

$$z_2 = \sum_{e \in E_0} |t_{e,r} - t_{e,o}| \quad (2)$$

式中:

e ——事件-活动网络中的列车事件序号;

E_0 ——调整前运行图中列车事件集合;

$t_{e,o}$ ——调整前运行图中事件 e 的发生时间;

$t_{e,r}$ ——调整后运行图中事件 e 的发生时间。

从乘客出行成本角度,选用所有乘客在站台的等待时间之和最小作为第三个目标函数 z_3 ,其计算式为:

$$z_3 = \sum_{1 \leq j < T} \sum_{1 \leq i < I} \text{sgn} \left(P_{i,j} - \sum_{k \in K} \xi_{j,k,i} C_{\text{train}} L \right) (t_{j+1} - t_j) \quad (3)$$

式中:

k ——运行图列车集合中的列车序号;

K ——运行图中的列车集合;

t_j ——第 j 个时间段;

T ——时间段总数;

i ——车站序号;

I ——车站总数;

$\xi_{j,k,i}$ ——0-1 决策变量,其值取 1 时表示列车 k 在 t_j-t_{j+1} 时间段内在车站 s_i 至车站 s_{i+1} 的区间运

行,取 0 时表示列车 k 在 t_j-t_{j+1} 时间段内不在 s_i 至 s_{i+1} 的区间运行;

C_{train} ——列车定员人数;

L ——列车最大满载率;

$P_{i,j}$ —— t_j-t_{j+1} 内 s_i 至 s_{i+1} 区间通过的乘客数;

$\text{sgn}(\cdot)$ ——符号函数,若 t_j-t_{j+1} 内 s_i 至 s_{i+1} 区间的运能大于等于乘客数,则返回 0;否则,返回运能与乘客数的差值。

2.3 约束条件

2.3.1 列车安全运行约束

在列车运行过程中,受到基础设施、信号系统等方面的限制,为保证列车运行安全,需满足车站停站时间、区间运行时间、列车到达/出发间隔时间等的约束条件,其计算式为:

$$t_{e_2,r} - t_{e_1,r} \geq t_{a,\min} \sigma_{a,\text{stop}}, \forall a \in A_{\text{dwell}} \cup A_{\text{pass}} \quad (4)$$

$$t_{e_2,r} - t_{e_1,r} \leq t_1 \sigma_{a,\text{stop}}, \forall a \in A_{\text{dwell}} \cup A_{\text{pass}} \quad (5)$$

$$t_{e_2,r} - t_{e_1,r} \geq t_{a_2,\min} + \sigma_{a_1,\text{stop}} t_{a_1,\text{acc}} + \sigma_{a_3,\text{stop}} t_{a_3,\text{dec}}, \quad \forall a_1, a_3 \in A_{\text{dwell}} \cup A_{\text{pass}}, a_2 \in A_{\text{run}} \quad (6)$$

$$t_{e_2,r} - t_{e_1,r} \geq t_{a,\min}, \forall a \in A_{\text{de,ar}} \cup A_{\text{de,de}} \cup A_{\text{ar,ar}} \quad (7)$$

式中:

e_1, e_2 ——事件集合中的第 1、2 个事件;

a_1, a_2, a_3 ——活动集合中的第 1、2、3 个活动;

$t_{e_2,r}$ ——调整后运行图中事件 e_2 的发生时间;

$t_{e_1,r}$ ——调整后运行图中事件 e_1 的发生时间;

$t_{a,\min}$ ——活动 a 的最小持续时间;

$t_{a_2,\min}$ ——活动 a_2 的最小持续时间;

$\sigma_{a,\text{stop}}$ ——0-1 决策变量,其值取 1 时表示活动 a 停站,取 0 时表示活动 a 不停站;

$\sigma_{a_1,\text{stop}}$ ——0-1 决策变量,其值取 1 时表示活动 a_1 停站,取 0 时表示活动 a_1 不停站;

$\sigma_{a_3,\text{stop}}$ ——0-1 决策变量,其值取 1 时表示活动 a_3 停站,取 0 时表示活动 a_3 不停站;

t_1 ——足够长的时间,本文取 $t_1 = 1440$ s;

$t_{a_1,\text{acc}}$ ——活动 a_1 的起停附加时间;

$t_{a_3,\text{dec}}$ ——活动 a_3 的起停附加时间。

2.3.2 取消列车约束

将取消列车的事件时间调整到运营结束以后,以保证正常开行列车能满足所有时间约束,其计算式为:

$$t_{e,r} = t_{e,o} + \sigma_e t_2, \forall e \in E_{\text{cancel}} \quad (8)$$

式中:

σ_e ——0-1 决策变量,其值取 1 时表示事件 e 取

消,取0时表示事件 e 不取消;

t_2 ——比 t_1 更长的时间,本文取 $t_2 = 2 t_1$;

E_{cancel} ——取消事件的集合。

2.3.3 列车加开对已有运行图影响约束

在调整前后序列车到发时间以满足加开列车到发时间的间隔约束时,不能对前后序列车的到发时间造成太大的偏移。因此,为尽量避免对初始运行图的单个列车运行时间进行大范围调整,在建模过程中,对加开列车对初始运行图单个列车运行时间的最大允许调整偏移进行约束,其计算式为:

$$-t_{\text{offset}} \leq t_{e,r} - t_{e,o} \leq t_{\text{offset}}, \forall e \in E_{\text{ar}} \cup E_{\text{de}} \quad (9)$$

式中:

t_{offset} ——允许调整的最大偏移时间;

E_{ar} ——列车到达事件集合;

E_{de} ——列车出发事件集合。

2.3.4 列车折返接续约束

列车在终到站和始发站时必须且有只有1个接续活动,除了接续列车条件,2列列车进行接续时还须保证接续车站具备折返条件,满足接续站的最小车底接续时间要求,其计算式为:

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_{e_1} = 1, \forall e_1 \in E_{\text{de,ori}}, a \in A_{\text{conn,de}}, \text{end}(a) = e_1 \quad (10)$$

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_{e_2} = 1, \forall e \in E_{\text{ar,des}}, a \in A_{\text{conn,ar}}, \text{begin}(a) = e_2 \quad (11)$$

$$t_{e_1,r} - t_{e_2,r} \geq t_{a,\text{min}} \sigma_{a,\text{turn}} - t_1 \sigma_{e_2}, \forall a \in A_{\text{conn}} \quad (12)$$

式中:

σ_{e_1} ——0-1决策变量,其值取1时表示事件 e_1 取消,取0时表示事件 e_1 不取消;

σ_{e_2} ——0-1决策变量,其值取1时表示事件 e_2 取消,取0时表示事件 e_2 不取消;

$E_{\text{de,ori}}$ ——始发站出发事件的集合;

$E_{\text{ar,des}}$ ——终到站到达事件的集合;

$A_{\text{conn,de}}$ ——出发事件的接续活动集合;

$A_{\text{conn,ar}}$ ——到达事件的接续活动集合;

$\text{begin}(a)$ ——活动 a 的开始函数;

$\text{end}(a)$ ——活动 a 的终止函数。

2.3.5 列车可用车底限制约束

由于场段、车站存车线的容量限制,列车从停车场或存车线始发上线时,需要满足停车场配备车辆数量限制要求,其计算式为:

$$\sum_u \sigma_{u,\text{turn}} - \sum_v \sigma_{v,\text{turn}} \leq n_{x,o}, \forall d_x \in D_{\text{dep}},$$

$$v \in A_{\text{conn,ar}}, u \in A_{\text{conn,de}} \quad (13)$$

$$\sum_v \sigma_{v,\text{turn}} - \sum_u \sigma_{u,\text{turn}} \leq n_{x,\text{max}} - n_{x,o}, \forall d_x \in D_{\text{dep}},$$

$$v \in A_{\text{conn,ar}}, u \in A_{\text{conn,de}} \quad (14)$$

式中:

u ——出发事件接续活动集合中的活动序号;

v ——到达事件接续活动集合中的活动序号;

$n_{x,o}$ ——第 x 个停车场、车辆段或车站存车线的初始存放列车数量;

$n_{x,\text{max}}$ ——第 x 个停车场、车辆段或车站存车线的最大可存放列车数量;

$\sigma_{v,\text{turn}}$ ——0-1决策变量,其值取1时表示接续折返活动 v 被选择,取0时表示接续折返活动 v 未被选择;

$\sigma_{u,\text{turn}}$ ——0-1决策变量,其值取1时表示接续折返活动 u 被选择,取0时表示接续折返活动 u 未被选择。

2.4 独立运用策略下列车加开计划调整模型

车底独立运用时,须分别满足式(15)~(18):

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_{e_1} = 1, \forall e_1 \in E_{\text{de,ori}}, a \in A_{\text{plan}}, \text{end}(a) = e_1 \quad (15)$$

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_e = 1, \forall e \in E_{\text{ar,des}}, a \in A_{\text{plan}}, \text{begin}(a) = e \quad (16)$$

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_{e_1} = 1, \forall e_1 \in E_{\text{de,ori}}, a \in A_{\text{add}}, \text{end}(a) = e_1 \quad (17)$$

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_e = 1, \forall e \in E_{\text{ar,des}}, a \in A_{\text{add}}, \text{begin}(a) = e \quad (18)$$

式中:

A_{plan} ——已有运行图列车的接续活动集合;

A_{add} ——独立运用策略下加开列车的接续活动集合。

独立运用策略下,设 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为3个目标函数 z_1 、 z_2 、 z_3 的权重系数,并将 z_1 、 z_2 、 z_3 量纲一化,得到该策略下列车加开计划调整模型 z 的计算式为:

$$\min z = \omega_1 z_1 + \omega_2 z_2 + \omega_3 z_3 \quad (19)$$

2.5 套跑混合运用策略下列车加开计划调整模型

设 A_{all} 为套跑混合策略下车底接续活动集合。套跑混合运用策略下,列车加开计划须满足以下计算式:

$$\sum_a \sigma_{a,\text{turn}} + \sigma_{e_1} = 1, \forall e_1 \in E_{\text{de,ori}}, a \in A_{\text{all}}, \text{end}(a) = e_1 \quad (20)$$

$$\sum_a \sigma_{a, \text{turn}} + \sigma_e = 1, \forall e \in E_{\text{ar, des}}, a \in A_{\text{all}},$$

$$\text{begin}(a) = e \quad (21)$$

套跑混合运用策略下, 设 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 分别为 3 个目标函数 z_1 、 z_2 、 z_3 的权重系数, 并将 z_1 、 z_2 、 z_3 量纲一化, 得到该策略下列车加开计划调整模型 z 的计算式为:

$$\min z = \psi_1 z_1 + \psi_2 z_2 + \psi_3 z_3 \quad (22)$$

3 算法设计

在对列车加开计划调整问题进行分析的基础上, 考虑到模型决策变量多、约束条件复杂等特征, 本文进一步提出了一种混合遗传禁忌搜索算法, 即: 将遗传算法的快速随机搜索、全局搜索能力与禁忌搜索算法的局部搜索能力相结合, 通过禁忌表对子代的更新进行约束, 以避免陷入局部最优, 从而更高效地处理问题。

1) 染色体编码。采用染色体多排列实数编码策略, 每个染色体由上行列车顺序和下行列车顺序 2 个部分组成, 染色体的长度为上、下行列车的数量之和, 个体中每个基因按照列车在大小交路共线运行区段出发时间按从早到晚的顺序进行编号。

2) 初始种群生成。在生成初始种群时, 先固定已有运行图的列车发车顺序, 然后将加开列车随机插入到已有运行图的列车发车顺序中。为了增加种群的多样性, 在初始种群生成时将列车到发间隔时间约束看作松弛约束, 暂不考虑该约束条件。

3) 适应度函数。设 y 为个体的编号, $\text{Fix}(y)$ 为适应度函数值, $w_1(y)$ 为种群里目标函数值的上限, $w(y)$ 为个体的目标函数值, 对目标函数进行变换后作为适应度函数, 其计算式为:

$$\text{Fix}(y) = w_1(y) - w(y) \quad (23)$$

4) 遗传操作。以一定的交叉概率对上行和下行列车顺序 2 个基因片段分别进行改进顺序交叉操作。选用交换算子变异方式, 对上行列车顺序、下行列车顺序 2 个基因片段分别进行变异操作。

5) 禁忌表。禁忌表可以避免算法在搜索过程中陷入局部最优解, 当某个个体被选择为父代种群个体时, 将该个体移动到禁忌表。若遗传操作后新生成的子代种群个体在禁忌表中, 且个体不满足禁忌特赦准则, 则重新生成 1 个子代个体。

4 算例分析

4.1 算例情况及参数设置

选取深圳地铁 11 号线相关数据作为算例场景

进行计算分析。对部分参数值设定如下: ① 高峰时段的列车开行间隔为 5 min, 非高峰时段的列车开行间隔为 7 min 50 s; ② 最小停站时间为 30 s, 列车最小的到到间隔、发发间隔、发到间隔、折返时间均为 180 s; ③ 乘客等待单位时间的权重系数为 0.1, 已有运行图列车调整偏移的权重系数为 1, 单位车底配置的权重系数为 300 000; ④ 算法参数中最大迭代次数 G 为 150, 种群大小 N 为 100, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。

选取该线宝安站附近的宝安体育中心举办演唱会作为可预知大客流场景并进行计算分析。将列车最大满载率设为 138%, 经计算, 在演唱会开始前的晚高峰时段需要加开 7 对列车, 在演唱会结束后的非高峰时段需要加开 5 对列车。

4.2 算例结果分析

使用 Intel Core i7 1.80 GHz CPU (中央处理器) 和内存为 16 GiB 的计算机, 采用 Windows 10 操作系统, 并采用 Microsoft visual C#2019 编程软件, 调用 CPLEX 12.6.3 程序完成本算例计算。

针对独立运用策略和套跑混合运用策略, 分别在单一交路和大小交路 2 种运行方式下, 选择在晚高峰时段和非高峰时段加开列车。其中: 小交路为福田站—机场北站, 大交路为福田站—碧头站, 大小交路列车开行比例为 1:1; 加开列车时间窗口设置为 120 min。对模型进行求解, 得到列车加开计划调整结果如表 1 所示。

高峰时段、非高峰时段加开列车的最优方案分别是算例场景 4 和算例场景 8。经计算, 实施列车加开后, 大客流集中区域的列车满载率均有所减少, 均小于本文设置的列车最大满载率。在客流需求相对较低的区间, 与单一交路相比, 采用大小交路加开方式避免了运力的浪费, 可以更好地平衡运营成本与客运服务水平的关系。

从表 1 可以明显看出: ① z_1 显著减少, 说明了采用大小交路可减少车底运用数量; ② 在 z_3 的计算结果中, 单一交路独立运用策略下的乘客等待时间最短; ③ 根据 z_3 的结果显示, 大小交路独立运用策略下的运行图调整偏移值最小, 单一交路套跑混合运用策略下运行图调整偏移值最大, 但不同运行方式和接续策略的调整偏移值间差别不大; ④ 从 z 的角度分析, 单一交路套跑混合运用策略下 z 最大, 大小交路混合套跑策略下 z 最小, 在高峰时段后者较前者约减少了 8.21%。

表1 列车加开计划调整结果

Tab.1 Results of operation schedule adjustment for inserting extra trains into operation

算例场景	运行交路及车底运用策略	运营时段	列车开行数/对		$z_1/\text{列}$	z_2/s	z_3/min	z
			大交路	小交路				
1	单一交路独立运用	高峰	26	0	26	65 507	147 686	8 751 623
2	大小交路独立运用	高峰	19	7	24	64 812	185 535	8 378 022
3	单一交路套跑混合运用	高峰	26	0	26	66 713	150 284	8 768 417
4	大小交路套跑混合运用	高峰	19	7	23	66 199	189 432	8 102 791
5	单一交路独立运用	非高峰	20	0	20	21 058	82 564	6 516 442
6	大小交路独立运用	非高峰	15	5	19	20 933	112 377	6 395 195
7	单一交路套跑混合运用	非高峰	20	0	20	21 400	90 138	6 562 228
8	大小交路套跑混合运用	非高峰	15	5	18	21 344	113 594	6 102 908

以上算例结果验证了本文所建模型的可行性和有效性。该模型可支持不同交路、不同车底接续策略下列车加开计划的需求,且在非高峰时段和高峰时段均具有适用性。在实际应用中,选择大小交路运行方式能够显著降低线路的运营成本,特别是在车辆资源相对有限的情况下,调度员灵活采用大小交路混合套跑策略,可最大程度提高运输能力,有效缓解高峰时段的客流压力。

4.3 加开时间窗口范围影响分析

为分析列车加开时间窗口对运营的影响,以17:00为起始时刻,第1个计算工况的加开列车窗口时间为90 min,后续计算工况均在前1个工况基础上增加10 min,直至加开列车窗口时间为210 min。在每个计算工况内加开7对列车,用本文的算法进行求解,对比各计算工况下所需的车底数,其结果如图3所示。

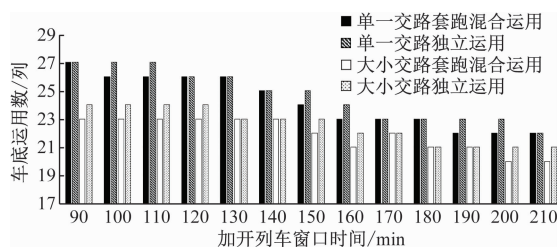


图3 不同加开时间窗口计算工况下所需车底数的对比

Fig.3 Comparison of required train sets under different time windows and scenarios of additional train operation

由图3可知:①在相同加开列车窗口时间下,采用大小交路的车底运用数量明显少于单一交路。②在相同的交路方式下,套跑混合运用策略的车底运用数一般少于独立运用策略,二者的差值一般为1。整体来看,大小交路套跑混合运用策略的车底运

用数量最少。③随着加开列车窗口时间的增加,加开相同数量列车时,车底运用数量整体呈递减趋势。④在相同开行条件下,加开列车窗口时间越短,相较于单一交路,大小交路所需的车底运用数更少。

设 t_1 为已有列车的交路运行时间, t_{add} 为加开列车的交路运行时间, I_1 为已有列车的行车间隔, I_{add} 为加开列车的行车间隔,则有:

$$0 \leq (t_1/I_1) \bmod 1 + (t_1/I_{add}) \bmod 1 \leq 1 \quad (24)$$

$$0 \leq (t_1/I_1) \bmod 1 + (t_{add}/I_{add}) \bmod 1 \leq 1 \quad (25)$$

对比同一加开列车窗口时间的独立运用策略和套跑混合运用策略可以发现,在单一交路满足式(24)、大小交路满足式(25)时,2种策略的车底运用数量相同。这些发现为特定条件下选择最优车底接续策略提供了明确的依据。在给定的时间窗口内,在满足式(24)或式(25)的情况下,无论是开行单一交路还是开行大小交路,2种策略的车底运用数量相同。这为调度员提供了不同运营场景下的灵活处置方案,调度员可以根据实际情况从运营成本、运营组织、乘客满意度3个角度进行权衡,进而得到最优方案。

5 结语

本文将城市轨道交通列车运行过程形式化描述为事件-活动网络,在考虑列车运行等约束条件,以及独立运用、套跑混合运用2种策略的基础上,构建了基于可预知大客流的列车加开计划调整模型,并提出了混合遗传禁忌搜索算法。该算法将遗传算法的全局搜索能力与禁忌搜索算法的局部搜索能力相结合,可更高效地处理问题。最后,结合地

铁线路实际数据,在高峰时段和非高峰时段分别构建了不同的算例场景,验证了本文所提模型和算法的可行性和有效性。计算数据表明,该模型及算法在不同时段、不同运行交路及不同车底接续策略下均具有适用性。

列车加开计划调整是复杂的大规模组合优化决策问题,本文从运行计划调整和车底周转接续协同优化的角度,对可预知大客流条件下的列车加开计划调整问题进行了讨论,但并未考虑运营过程中不确定客流等多种随机因素的影响。因此,研究受不确定客流等多种随机因素影响的列车加开实时调整方案,是下一阶段研究工作的重点。

参考文献

- [1] 易志刚,戴贤春.城市轨道交通列车加开计划编制模型研究[J].应用科技,2024,51(3):150.
YI Zhigang, DAI Xianchun. A study on the model for inserting additional trains into existing timetables in urban rail transit [J]. Applied Science and Technology, 2024, 51(3):150.
- [2] LIU Y, CAO C. A multi-objective train operational plan optimization approach for adding additional trains on a high-speed railway corridor in peak periods [J]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5554.

- [3] ZHAO J, LI H, MENG L, et al. An optimization method of high-speed railway rescheduling to meet unexpected large passenger flow [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022: 5964010.
- [4] 陈亚茹. 高速铁路周期性列车运行图抽线与加线理论与方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CHEN Yaru. Theory and method of the deleting and adding train paths into cyclic timetables [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [5] 徐涵. 基于灵活接续的周期性列车运行图加线理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
XU Han. The adding train paths theories and methods on cyclic timetable based on flexible connection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [6] 张皓翔. 城市轨道交通可预知大客流场景下临客开行优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHANG Haoxiang. Study on the optimization of temporary passenger train operation for urban rail transit under predictable mass passenger flow [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

· 收稿日期:2024-01-22 修回日期:2024-03-08 出版日期:2024-09-10
Received:2024-01-22 Revised:2024-03-08 Published:2024-09-10
· 通信作者:易志刚,副研究员,nudt_yizhigang@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 17 页)

参考文献

- [1] 姚佼,张凯敏.铁路乘客车票实名制现状问题及对策研究[J].物流科技,2017,40(9):71.
YAO Jiao, ZHANG Kaimin. Problem and countermeasure study of passenger ticket real Name mechanism in railway system [J]. Logistics Sci-Tech, 2017, 40(9):71.
- [2] 罗慧,吴殿华,梁笛.广东城际铁路公交化多元支付票务系统设计[J].城市轨道交通研究,2021,24(12):130.
LUO Hui, WU Dianhua, LIANG Di. Design of Guangdong intercity railway public transportation multi-payment ticketing system [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12):130.

- [3] 赵丁.杭州都市圈城际铁路与城市轨道交通互联互通研究[J].铁道勘察,2023,49(2):64.
ZHAO Ding. Study on intercity railway and urban rail transit interconnection in Hangzhou metropolitan area [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(2):64.
- 收稿日期:2023-09-18 修回日期:2023-12-11 出版日期:2024-09-10
Received:2023-09-18 Revised:2023-12-11 Published:2024-09-10
· 通信作者:张瀛丹,工程师,jobzyd@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821