

DOI: 10.13879/j.issn.1000-7458.2022-08.21484

## 高速铁路客运站到发线运用方案调整研究

丁舒忻, 张涛, 王荣笙, 袁志明

**摘要:** 针对高速铁路列车在客运站作业时受到干扰导致列车到达晚点的问题, 提出调整车站到发线运用方案, 保障列车正常运行。建立最小化总晚点时分和最小化列车到发线调整次数的多目标混合整数规划模型; 采用分层序列法进行求解; 通过仿真实验, 实现了列车到发线冲突的有效疏解, 验证了该模型及算法的有效性。

**关键词:** 高速铁路; 冲突疏解; 到发线运用方案调整; 列车晚点; 多目标优化

**中图分类号:** U292.15 **文献标识码:** A

## Research on Rescheduling of Arrival and Departure Tracks at High-speed Railway Passenger Station

Ding Shuxin, Zhang Tao, Wang Rongsheng, Yuan Zhiming

**Abstract:** To deal with train arrival delays resulting from the disturbances of train operation at passenger station on high-speed railway, operation plan of arrival and departure tracks is rescheduled to ensure normal train operation. A multi-objective mixed-integer programming model with objectives of minimum total train delays and minimum number of adjustment of train arrival and departure track is formulated, which can be solved through the stratified sequencing method. In the simulation experiment, the conflicts in arrival and departure tracks are solved effectively, which verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm.

**Key words:** High-speed railway; Conflict resolution; Rescheduling of arrival and departure tracks; Train delay; Multi-objective optimization

高速铁路客运站到发线是车站运输组织的重要组成部分, 其运用情况对车站作业效率和列车通过能力有直接影响<sup>[1-2]</sup>。如果车站作业受到干扰, 诸如线路干扰、恶劣天气等, 导致列车大量晚点到达<sup>[3]</sup>, 则原有的到发线运用方案将无法执行, 需要快速、高效地调整到发线运用方案及列车到

发时刻, 减少对车站作业的延误和列车运行的影响, 从而保证列车运行安全, 尽快恢复列车正常运行秩序<sup>[4]</sup>。

目前到发线运用方案调整主要通过建立数学规划模型进行求解。常见使用的模型包括0-1线性规划模型<sup>[3, 5]</sup>、混合整数线性规划模型<sup>[4, 6-7]</sup>、非线

丁舒忻: 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所 副研究员 100081 北京

张涛: 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所 研究员 100081 北京

王荣笙: 中国铁道科学研究院研究生部 博士研究生 100081 北京

袁志明: 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所 研究员 100081 北京

基金项目: 国家自然科学基金-高铁联合基金 (U1834211, U1934220); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目 (2021YJ315)

收稿日期: 2021-12-22

性整数规划模型<sup>[8-9]</sup>等。考虑的优化目标主要以最小化的总晚点时分为主,同时考虑其他优化目标,包括最小化到发线使用费用之和<sup>[3,5]</sup>、最小化车站作业秩序影响<sup>[4]</sup>、最小化车站设备的不均衡性<sup>[8]</sup>等。通常采用分支定界算法<sup>[4,8]</sup>精确求解或者启发式算法(如遗传算法<sup>[1]</sup>、模拟退火<sup>[3]</sup>等)近似求解。

本文针对高速铁路客运站列车到达晚点情况,通过调整列车到发线运用方案、列车到发时刻和列车到发次序,以最小化列车总晚点时分和列车到发线调整次数为双优化目标,建立高速铁路客运站到发线运用方案调整的混合整数规划模型;采用分层序列法进行求解,并通过算例对模型和求解算法进行验证。

## 1 到发线运用方案调整需求

高速铁路客运站的调度集中车站子系统,在收到调度中心列车调度员下达的列车运行计划信息后,生成车站接发车作业计划,通过办理相应接发车进路,完成到发线的有效运用。然而,在发生列车大量晚点的情况下,列车延误会对车站原有到发线运用方案产生干扰,具体体现在:同一处到发线上前车占用时间与后续列车产生冲突,后续列车无法在计划时间正常接入到发线;相邻列车在进入接车进路或发车进路时产生冲突。本文考虑在固定到发线数量基础上,通过调整到发线运用方案,改变列车接入的到发线;通过调整到发线占用时间段,消解车站到发线运用冲突,保证列车在车站作业时满足行车相关规章及《站细》要求<sup>[2]</sup>。

在调整到发线运用方案时,需保证列车仅选择1条到发线,同一到发线同时仅能被1趟列车占用,列车在使用到发线时应保证其运行安全,避免列车之间发生冲突;在调整列车到发时刻时,应保证其不早于图定到发时刻,对应停站时间满足图定要求,保证旅客充足的乘降时间及列车其他作业要求。在充分使用车站能力的情况下,最小化列车总晚点时分,同时在到发线计划运用方案基础上最小化到发线调整次数。此外,计算调整后的到发线运用方案需要保证一定的实时性,从而满足实际调度指挥需求。

不同于现有系统中调度员通过个人经验人工调整,本文通过研究到发线运用方案,建立多目标优化模型和方法,调整到车接发车作业。调整后的方案决定了到发线运用效果,应尽量减少对原有列车

运行计划的影响,避免列车晚点在路网中的传播。此外,应不改变或尽量少改变原计划到发线运用方案。因此,考虑最小化列车总晚点时分和最小化到发线调整次数2个优化目标。通过建立到发线运用方案调整模型并进行求解,实现更加智能、高效的到发线运用方案调整。

到发线运用方案调整模型考虑如下假设条件:

- 1) 已知车站站场布置情况、到发线计划运用方案和列车图定到发时刻;
- 2) 到发线数量满足列车计划正常接发车;
- 3) 列车完全按照运行计划和高速铁路车站各项标准作业时间行车;
- 4) 上、下行列车所使用的到发线独立,因此模型中仅考虑下行线涉及列车的到发线调整;
- 5) 站内设备正常工作,车站内不存在行车事故;
- 6) 部分列车存在到达晚点情况,到达晚点时间已知;
- 7) 仅考虑列车进路一次性解锁情况,不考虑列车进路的分段解锁。

## 2 模型建立

### 2.1 参数及变量说明

定义模型参数和决策变量: $i$ 为到发线编号; $l, k$ 为列车编号; $I$ 为车站到发线集合; $L$ 为列车集合; $\tau_l^{\text{arr}}$ 为列车 $l$ 图定到达时刻; $\tau_l^{\text{dep}}$ 为列车 $l$ 图定出发时刻; $T$ 为相邻列车占用同一到发线最小安全间隔时间; $h^{\text{arr}}$ 为车站列车到达追踪间隔时间; $h^{\text{dep}}$ 为车站列车出发追踪间隔时间; $\Delta_l$ 为列车 $l$ 的图定到发线停留时间; $\chi_{li}$ 为到发线运用方案图定计划,当列车 $l$ 计划占用到发线 $i$ 时为1,否则为0; $d_l$ 为列车 $l$ 到达晚点时间; $M$ 为足够大的数; $x_{li}$ 为决策变量,当列车 $l$ 占用到发线 $i$ 时为1,否则为0; $t_l^{\text{arr}}$ 为决策变量,表示列车 $l$ 实际到达时刻; $t_l^{\text{dep}}$ 为决策变量,表示列车 $l$ 实际出发时刻; $q_{lk}^{\text{arr}}$ 为决策变量,当列车 $l$ 先于列车 $k$ 占用到发线为1,否则为0; $q_{lk}^{\text{dep}}$ 为决策变量,当列车 $l$ 先于列车 $k$ 离开到发线为1,否则为0。

### 2.2 目标函数

为了实现到发线运用方案的有效调整,考虑如下目标函数。

$$\min Z_1 = \sum_{l \in L} (t_l^{\text{arr}} - \tau_l^{\text{arr}}) + \sum_{l \in L} (t_l^{\text{dep}} - \tau_l^{\text{dep}}) \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{l \in L} \text{sgn}(t_l^{\text{arr}} - \tau_l^{\text{arr}}) + \sum_{l \in L} \text{sgn}(t_l^{\text{dep}} - \tau_l^{\text{dep}}) + \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} 0.5|x_{li} - \chi_{li}| \quad (2)$$

式(1)为最小化列车总晚点时分,通过计算运行调整后所有列车实际到达时刻与图定到达时刻之差,加上实际出发时刻与图定出发时刻之差得到。式(2)为最小化到发线调整次数,通过计算所有列车实际到达和出发总晚点次数加上到发线调整次数得到。 $\text{sgn}(\bullet)$ 为符号函数,返回对应参数的正负号,若调整后列车到达或发车时刻晚于图定时刻,则返回值为1,记录一次晚点;等于图定时刻,则返回值为0,不记录晚点次数;由于调整之后列车到发的时刻不允许早于图定时刻,式(2)中符号函数返回值不为负数。 $\sum_{i \in I} |x_{li} - \chi_{li}|$ 在列车 $l$ 到发线调整时为2,不变时为0,所以乘上系数0.5,保证调整到发线时记录一次调整。

### 2.3 约束条件

为了保证到发线运用时的安全性和合理性,考虑如下约束条件。

$$\sum_{i \in I} x_{li} = 1, \forall l \in L \quad (3)$$

$$t_k^{\text{arr}} - t_l^{\text{dep}} \geq Tq_{lk}^{\text{arr}} - M(3 - x_{li} - x_{kl} - q_{lk}^{\text{arr}}), \forall l, k \in L, l \neq k, i \in I \quad (4)$$

$$t_k^{\text{arr}} - t_l^{\text{arr}} \geq h^{\text{arr}} q_{lk}^{\text{arr}} - M(1 - q_{lk}^{\text{arr}}), \forall l, k \in L, l \neq k \quad (5)$$

$$t_k^{\text{dep}} - t_l^{\text{dep}} \geq h^{\text{dep}} q_{lk}^{\text{dep}} - M(1 - q_{lk}^{\text{dep}}), \forall l, k \in L, l \neq k \quad (6)$$

$$q_{lk}^{\text{arr}} + q_{kl}^{\text{arr}} = 1, \forall l, k \in L, l \neq k \quad (7)$$

$$q_{lk}^{\text{dep}} + q_{kl}^{\text{dep}} = 1, \forall l, k \in L, l \neq k \quad (8)$$

$$t_l^{\text{dep}} \geq t_l^{\text{arr}} + \Delta_l, \forall l \in L \quad (9)$$

$$t_l^{\text{arr}} \geq \tau_l^{\text{arr}} + d_l, \forall l \in L \quad (10)$$

$$t_l^{\text{dep}} \geq \tau_l^{\text{dep}}, \forall l \in L \quad (11)$$

$$t_l^{\text{arr}}, t_l^{\text{dep}} \geq 0, \forall l \in L \quad (12)$$

$$x_{li} \in \{0, 1\}, \forall l \in L, i \in I \quad (13)$$

$$q_{lk}^{\text{arr}}, q_{lk}^{\text{dep}} \in \{0, 1\}, \forall l, k \in L, l \neq k \quad (14)$$

式(3)保证了列车 $l$ 在可选到发线集合中仅选择其中一条到发线进行作业;式(4)保证了同一到发线上不同的2趟列车之间的最小安全间隔时间;式(5)和式(6)保证了任意2趟列车到达和出发追踪间隔时间满足车站要求,避免不同接车进路和发车进路存在冲突;式(7)和式(8)根据列车 $l$ 与列车 $k$ 之间的先后关系进行了限制,保证了列车到发次序的唯一性;式(9)保证了列车在到发线上停留时间不少于图定停留时间;式(10)保

证了实际到达时刻不早于图定到达时刻与到达晚点时间之和;式(11)保证了实际出发时刻不早于图定出发时刻;式(12)保证实际到达和出发时刻为非负变量;式(13)和式(14)保证列车占用到发线变量、列车占用到发线次序变量和离开到发线次序变量为0或1整数变量。

由于式(2)中存在 $\text{sgn}(\bullet)$ 符号函数和绝对值计算,为非线性规划模型,为了便于求解,可通过增加辅助变量方法对模型进行线性化处理。上述模型构成了到发线运用方案调整模型,该模型为混合整数规划模型。

## 3 模型求解

针对上述到发线运用方案调整模型中的2个优化目标,采取分层序列法依次求解:首先仅以式(1)为优化目标进行单目标优化求解,得到优化目标 $Z_1$ 的最优值作为约束条件;再求解以式(2)为目标函数的模型,得到优化目标 $Z_2$ 的最优值;从而得到的到发线运用调整方案下列车总晚点时间最小,并有较少的到发线调整次数。

## 4 算例分析

根据本文模型,在处理器为Intel Core i5-8265U CPU 1.60GHz,内存为8GB的计算机上运行仿真实验,基于YALMIP工具包<sup>[10]</sup>,通过Matlab进行仿真验证。

### 4.1 算例描述

某高铁客运站站场布置示意图1。该车站共9条到发线和2条正线;在16:00至22:00时段内,考虑38趟下行列车在该站进行接发车作业;所有列车分别在到发线3G、5G、7G、9G和11G完成作业,不使用正线完成接发车作业;相邻列车占用同

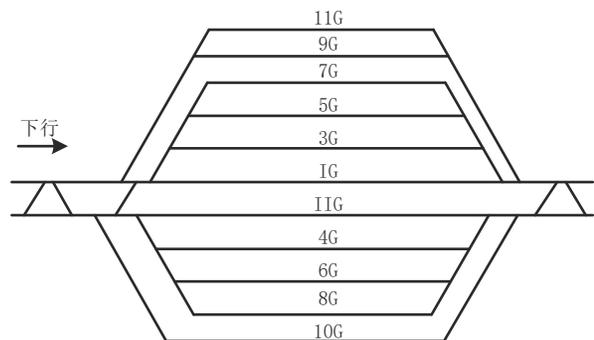


图1 某高铁客运站站场布置示意

一到发线最小安全间隔时间为 3 min，车站到达追踪间隔为 3 min，车站出发追踪间隔为 3 min，M 取值为 1 000。

到发线运用计划的图定方案见图 2。图 2 中每个矩形表示列车对到发线的占用，水平方向长度为占用时间，矩形上方为列车编号，黑色矩形表示没有发生调整的列车对应的到发线运用方案，蓝色矩形表示对列车到发线运用方案或列车到发时刻进行了调整。设置干扰场景为 6 趟列车到达晚点，分别为 G39、G41、G43、G45、G47 和 G49，晚点时间分别为 30 min、30 min、32 min、32 min、35 min 和 35 min。到达时刻先于 G39 的列车不进行到发线运用计划调整，所以实际可调整到发线运用的列车共 19 趟。

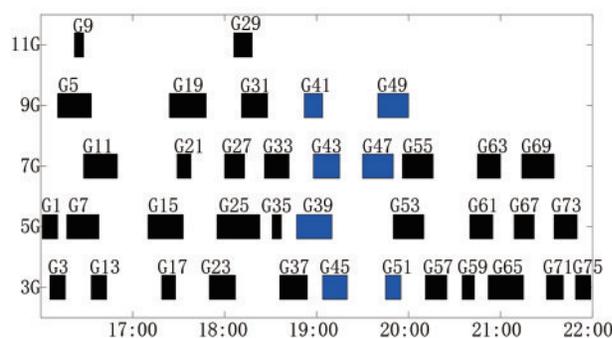


图 2 到发线运用计划图定方案

#### 4.2 计算结果

列车晚点时到发线运用计划调整方案见图 3。仿真运行 3.28 s 后得到最优解，其中列车总晚点时分为 391 min，到发线调整次数为 14。同时针对原混合整数非线性规划模型，仿真运行 12.29 s 后得到最优解。模型线性化后对求解效率有显著提高，满足调度指挥实时性要求，适合应用于实际铁路车站调度中。

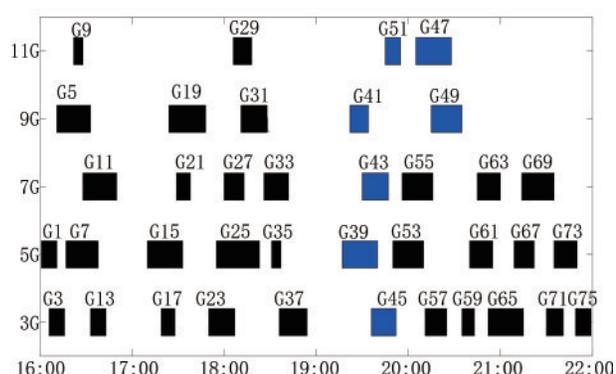


图 3 列车晚点时到发线运用计划调整方案

由图 2 和图 3 对比可知，实际 6 趟列车发生延误，共调整了 7 趟列车的到发线运用方案。具体列车调整信息见表 1，其中，G39、G41、G43、G45、G49 仅调整了列车到发时刻，列车对应的到发线和图定计划一致，对应到发线作业时间不变。G47 和 G51 虽然分别与调整到发时刻后的 G43 和 G45 产生了冲突，但均通过调整到发线至 11G 完成到发线冲突疏解，有效利用了 11G 的空闲资源。其中 G47 既调整了到发时刻，还调整了到发线位置，从 7G 调整至 11G。G51 仅调整了到发线，从 3G 调整至 11G，并没有受晚点列车影响产生连带晚点。此外，在图定到发线占用时间下，G47 和 G57 出发时刻相同（均为 20:25），产生了发车进路冲突。为了保证发车时列车间追踪间隔不少于 3 min，将 G47 占用时间长度由 20 min 增加为 23 min；若增加 G57 到发线占用时间，则额外产生一次出发晚点次数。其余列车到发线运用方案和到发时刻均不发生改变。可以看出，调整之后的到发线运用方案安全、合理，实时性好，确保未晚点列车正点运行，符合车站实际作业要求。

表 1 调整前后列车信息比较

列车编号	图定方案				调整方案			
	到达时刻/时分	出发时刻/时分	到发线	到发线作业时间/min	到达时刻/时分	出发时刻/时分	到发线	到发线作业时间/min
G39	18:47	19:10	5G	23	19:17	19:40	5G	23
G41	18:52	19:04	9G	12	19:22	19:34	9G	12
G43	18:58	19:15	7G	17	19:30	19:47	7G	17
G45	19:04	19:20	3G	16	19:36	19:52	3G	16
G47	19:30	19:50	7G	20	20:05	20:28	11G	23
G49	19:40	20:00	9G	20	20:15	20:35	9G	20
G51	19:45	19:55	3G	10	19:45	19:55	11G	10

## 5 结论

本文对高速铁路客运站到发线运用方案调整进行了研究,得到以下结论。

1) 针对列车到达晚点情况,建立了以最小化列车总晚点时分和到发线调整次数的多目标混合整数非线性规划模型,并对模型进行了线性化处理,降低了问题求解的复杂性。

2) 根据2个优化目标的优先级,采用分层序列法,首先最小化总晚点时分,之后再最小化到发线调整次数,实现了到发线运用方案的快速合理调整。

未来将考虑问题规模更大、场景更加复杂的情况,并通过启发式算法对问题进行快速求解。

### 参 考 文 献

- [1] 张文泉,余立建.一种基于遗传算法的进路搜索算法[J].铁道通信信号,2015,51(9):9-11,14.
- [2] 费振豪.高铁枢纽站股道运用计划智能调整系统的研究[J].铁道通信信号,2019,55(11):15-18.
- [3] 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.
- [4] 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.

(上接第21页)

问题,提出了基于5G-R的智能调度通信业务系统架构,根据对5G-R QoS业务保障原理的研究,提出了不同智能调度通信业务的QoS特性,并分析了5G-R网络保障调度通信业务稳定可靠传输的总体流程和保障机制,可为智能调度通信系统服务质量的提升提供参考,对铁路安全运营具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 王同军.铁路5G关键技术分析和路线[J].中国铁路,2020(11):1-9.
- [2] 何华武,朱亮,李平,等.智能高铁体系框架研究[J].中国铁路,2019(3):1-8.
- [3] 郭强亮,李辉,闫晓宇,等.基于关键业务通信机制的铁路智能调度通信技术研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):144-149.
- [4] 李春铎,郭强亮,蔺伟.LTE-R宽带移动通信系统调度通信技术方案研究[J].铁道通信信号,2019,55(S1):16-20.

- [5] 任禹谋,张琦,袁志明,等.基于滚动时域优化的高速铁路车站到发线动态调整研究[J].铁道运输与经济,2021,43(2):96-102.
- [6] Chakroborty P, Vikram D. Optimum assignment of trains to platforms under partial schedule compliance[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(2): 169-184.
- [7] Wang R, Bao Y, Hao W. Reallocating siding tracks in a railway station under severe disruptions[C]//2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). IEEE, 2018:1-5.
- [8] 马驹,孙建康,鲁工圆.高速铁路车站列车进路分配方案的优化与调整[J].中国铁道科学,2018,39(1):122-130.
- [9] Zhang L, Zheng W, Huang K, et al. Research on optimization method of station track platform based on improved discrete teaching and learning optimization algorithm[C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, 2021: 3432-3437.
- [10] Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C]//2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei: IEEE, 2004: 284-289.

(责任编辑:张利)

- [5] 郭强亮,王开锋,李辉,等.重载铁路MCX多媒体调度通信技术应用研究—以靖神铁路为例[J].铁道标准设计,2022,66(6):159-162,173.
- [6] 3GPP TS 23.501. System architecture for the 5G System (5GS);Stage 2 (Release 16)[S]. 2020.
- [7] 孙鲁泉,单洪政,赵军,等.铁路5G专网与GSM-R语音业务过渡方案研究[J].铁道通信信号,2021,57(10):75-80.
- [8] 3GPP TS 29.513. Policy and Charging Control signalling flows and QoS parameter mapping; Stage 3 (Release 16)[S]. 2021.
- [9] 3GPP TS 24.379. Mission Critical Push To Talk (MCPTT) call control; (Release 16)[S]. 2021.
- [10] 3GPP TS 29.514. 5G System; Policy Authorization Service;Stage 3 (Release 16)[S]. 2021.
- [11] 3GPP TS 29.512. 5G System; Session Management Policy Control Service;Stage 3 (Release 16)[S]. 2021.
- [12] 3GPP TS 29.244. Interface between the Control Plane and the User Plane Nodes;Stage 3 (Release 16)[S]. 2021.

(责任编辑:诸红)