

文章编号: 1003-1421(2022)07-0127-06 中图分类号: U284.4 文献标识码: A  
DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2022.07.19

# 区域临时限速下列车运行态势 在线推演研究

## Online Deduction of Train Operation Situation under Regional Temporary Speed Restriction

王荣笙<sup>1, 2</sup>, 张琦<sup>2</sup>, 闫璐<sup>1</sup>, 丁舒忻<sup>2</sup>

WANG Rongsheng<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, YAN Lu<sup>1</sup>, DING Shuxin<sup>2</sup>

(1. 中国铁道科学研究院 研究生部, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号  
研究所, 北京 100081)

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

**摘要:** 针对区域临时限速情形, 研究列车运行态势的在线推演, 为调度员实时预测列车运行态势信息。建立列车运行态势推演模型, 分析临时限速、电分相、坡度等线路条件下的列车牵引计算过程和工况转换关系, 给出列车在各位置处运行加速度、速度和通过时刻的计算方法。研究节时和最优节能驾驶策略下的列车运行态势离线推演方法。利用该方法下的运行态势历史信息, 提出基于专家系统的在线推演方法。仿真结果表明, 选取距离步长为 10 m 可有效保证求解精度和效率。相较于离线推演方法, 在线推演方法能有效减小列车晚点时间, 降低牵引能耗, 提升约 20 倍求解效率, 并为调度员实时提供列车在未来运行区间的加减速情况, 预测列车到站晚点时间, 辅助调度员调整阶段计划。

**关键词:** 铁路运输; 临时限速; 列车运行态势; 列车驾驶策略; 专家系统

**Abstract:** In the case of regional temporary speed restriction, this paper investigated online deduction of train operation situation to predict the operation of trains for dispatchers in real-time. Firstly, the study built the model of train operation situation to analyze the train traction calculation and condition transition relations under the line conditions of temporary speed restriction, neutral section, and gradient. The calculation methods of train acceleration, speed, and passing time at each position were proposed. Then, an offline deductive approach of train operation situation was researched in the time-efficient and optimal energy-efficient driving strategies. The online deductive approach based on expert systems was developed with the historical data of train operation situation in the offline deductive approach. The simulation results show that the distance step of 10 m can ensure solution accuracy and efficiency. Compared with the offline deductive approach, the online deductive approach can effectively reduce the train delay and traction energy consumption, improving the solution efficiency by about 20 times. This approach can also provide dispatchers with real-time acceleration and deceleration of trains in future block sections. Moreover, it can predict the train arrival delay, thereby assisting dispatchers to adjust the stage plan.

**Keywords:** Railway Transportation; Temporary Speed Restriction; Train Operation Situation; Train Driving Strategy; Expert System

**引用格式:** 王荣笙, 张琦, 闫璐, 等. 区域临时限速下列车运行态势在线推演研究 [J]. 铁路运输与经济, 2022, 44(7): 127-132.  
WANG Rongsheng, ZHANG Qi, YAN Lu, et al. Online Deduction of Train Operation Situation under Regional  
Temporary Speed Restriction[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(7): 127-132.

## 0 引言

准点率是影响铁路管理工作和旅客满意舒适的关键指标之一。铁路实际运营过程中,列车按照调度员下达的阶段调整计划运行,计划的科学合理与否关乎铁路运营的安全高效。其中,准确及时的列车运行态势是调度员调整阶段计划的关键信息之一<sup>[1]</sup>。列车运行态势包括列车在未来时间段内的运行位置、加速度、速度、区间运行时间和到站晚点时间等。当列车运行计划受突发事件影响发生偏移时,调度员需要综合考虑突发事件、线路条件、列车运行状态等在途信息,预估列车运行态势,及时调整阶段计划。但当面对多层次时变、多维强耦合的在途信息时,调度员难以及时推演列车运行态势信息,因信息迟滞而延后制定的阶段调整计划缺乏一定的科学性和合理性,凭人工经验多次调整运行图的工作量较大。若不及时给出合理的阶段调整计划,列车晚点将快速传播,严重影响铁路运营效率和旅客满意度。因此,复杂路网条件下,及时准确的列车运行态势推演是铁路运营管理和列车运行调整的关键问题之一,对辅助调度员制定更加高效实用的阶段调整计划具有重要作用。

列车驾驶策略决定列车运行态势的最终推演结果,主要包括节时和节能驾驶策略。通过采取节时驾驶策略推演高速铁路列车运行态势信息,原因包括2个方面:①高速铁路站间距离较长,列车较少采用惰行工况,导致节能驾驶策略下牵引能耗降低效果并不明显;②铁路运营管理更加关注晚点恢复情况,节能驾驶策略在保证牵引能耗最小的前提下,可能给列车带来额外的晚点时间。国内外学者针对列车驾驶策略优化问题,基于人工智能<sup>[2]</sup>、遗传算法<sup>[3]</sup>、专家系统<sup>[4]</sup>、最优控制<sup>[5]</sup>、动态规划<sup>[6]</sup>等,以准点率、旅客舒适度及牵引能耗为目标<sup>[7]</sup>进行优化。其中,专家系统是针对问题特性,通过“若(IF),则(THEN)”的知识表达形式模拟专家思维<sup>[4]</sup>,提升列车驾驶策略的合理性和实时性。因此,专家系统比较适合列车运行态势推演问题。故针对区域临时限速情形,基于专家系统生成列车节时驾驶策略,在线推演的列车运行态势为调度员调整阶段计划实时提供列车运行速度、时间等微观

信息,提升调度员调整阶段调整计划的可行性和精细化程度,降低调度员工作强度,提升高速铁路运营效率。

## 1 列车运行态势推演模型

高速铁路运行受到坡道坡度、曲率、空气阻力、电分相等线路条件的约束。设列车 $g \in \{1, 2, \dots, G\}$ , 车站 $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ , 位置 $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ ,  $G, I$ 和 $J$ 分别表示线路上列车、车站和位置点的总数。考虑区域临时限速情形如下:列车 $g$ 从车站 $i$ 发车,当经过第 $k$ 个临时限速区段时,由于突发事件影响,列车需降速运行经过临时限速区域 $(x_k, x_{k+1})$ ,调度员无法及时准确预测列车在限速区间 $(i, i+1)$ 的运行情况,以及列车到达下一不停车站 $i+1$ 的到站时刻。为此,结合列车动力学特性、列车运行态势历史信息 and 专家知识规则,提出列车运行态势在线推演方法,预测列车经过限速区间的时、速度、加速度以及到站晚点时间等。

### 1.1 工况转换约束

高速铁路列车运行过程中受到牵引力、制动力、基本阻力和附加阻力影响。牵引力和制动力分别通过线性插值法从牵引和制动特性曲线中计算得到。基本阻力通过经验公式计算<sup>[8]</sup>。附加阻力主要考虑坡道附加阻力,计算如公式(1)所示。

$$G(j) = m \cdot g' \cdot d(j) / 1000 \quad (1)$$

式中: $G(j)$ 为坡道附加阻力, N, 受列车 $g$ 在位置 $j$ 处的坡度 $d(j)$ 影响; $m$ 为列车质量, kg; $g'$ 为重力加速度,取常量值9.8,单位为N/kg。

列车运行工况主要分为牵引、巡航、惰行和制动,不同工况下列车的受力情况均不同,列车 $g$ 在不同工况下所受合力的计算公式如公式(2)所示。

$$C_{g,j} = \begin{cases} F_{g,j} - R(v_{g,j}) - G(j) & \text{牵引} \\ 0 & \text{巡航} \\ -R(v_{g,j}) - G(j) & \text{惰行} \\ -B_{g,j} - R(v_{g,j}) - G(j) & \text{制动} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{g,j}$ ,  $F_{g,j}$ ,  $B_{g,j}$ 和 $R(v_{g,j})$ 分别为列车 $g$ 在位置 $j$ 处的合力、牵引力、制动力和基本阻力, N。

巡航可理解为部分牵引或者部分制动。列车运行工况的状态转换图如图1所示。由图1可知,牵引和巡航无法直接与制动相互转换,需要通过惰

行过渡。其次，惰行也是列车经过无电分相区所采用的运行工况。当列车即将到达分相区时，列车需要提前减速到过分相允许的最高速度以下，并将运行工况转换为惰行，方可经过无电区段。

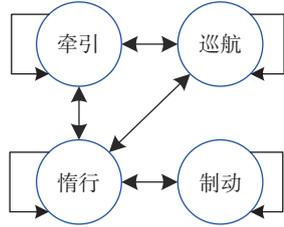


图1 列车运行工况的状态转换图

Fig.1 State transition diagram of train operation phases

考虑节时驾驶策略的同时，兼顾最优节能驾驶策略。列车最优节能驾驶策略是由“最大牵引—巡航—惰行—最大制动”的工况序列组成，该结论已由Howlett从理论上证明<sup>[9]</sup>。综上，计算列车在节时—最优节能驾驶策略下的运行态势信息。

## 1.2 列车运行态势信息计算

假设列车在同一距离间隔 $\Delta j$ 内所受合力不发生改变，通过距离步长的方法计算列车在各位置处的加速度、速度和通过时刻。

(1) 加速度的计算过程如公式(3)所示。

$$a_{g,j+1} = \min \left\{ \frac{C_{g,j+1}}{m(1+\gamma)}, a_{\max}, \delta_{\max} \cdot \Delta t_{g,j,j+1} + a_{g,j} \right\} \quad (3)$$

式中： $a_{g,j+1}$ 和 $a_{g,j}$ 分别为列车 $g$ 在位置 $j+1$ 和 $j$ 处的加速度， $\text{m/s}^2$ ； $C_{g,j+1}$ 为列车 $g$ 在位置 $j+1$ 处所受合力， $\text{N}$ ； $m$ 为列车质量， $\text{kg}$ ； $\gamma$ 为回转系数，指列车前进过程中产生的水平偏移对加速度的影响； $a_{\max}$ 为列车允许的最大加速度， $\text{m/s}^2$ ； $\delta_{\max}$ 为列车允许的最大冲击率，以保证旅客舒适度，数值上等于加速度在单位时间内的变化率， $\text{m/s}^3$ ； $\Delta t_{g,j,j+1}$ 为列车在前一距离间隔 $(j, j+1)$ 的运行时间， $\text{s}$ 。

由公式(3)可知，计算 $a_{g,j+1}$ 时考虑列车所受合力 $C_{g,j+1}$ 的同时，还需考虑最大加速度 $a_{\max}$ 和最大冲击率 $\delta_{\max}$ 的约束。

(2) 速度的计算过程如公式(4)所示。

$$v_{g,j+1} = \min \left\{ \hat{v}_{g,j+1}^k, \sqrt{(v_{g,j})^2 + 2 \cdot a_{g,j+1} \cdot \Delta j} \right\} \quad (4)$$

式中： $v_{g,j+1}$ 和 $v_{g,j}$ 分别为列车 $g$ 在位置 $j+1$ 和 $j$ 处

的速度， $\text{m/s}$ ； $\hat{v}_{g,j+1}^k$ 为列车 $g$ 在位置 $j+1$ 受第 $k$ 个临时限速区段影响下的限速值， $\text{m/s}$ 。

计算 $v_{g,j+1}$ 时需考虑 $\hat{v}_{g,j+1}^k$ 的影响，即若列车在最大牵引工况下的速度值大于 $\hat{v}_{g,j+1}^k$ ，则只能施加一部分牵引力，使实际 $v_{g,j+1} = \hat{v}_{g,j+1}^k$ 。

(3) 通过时刻的计算过程如公式(5)所示。

$$t_{g,j+1} \approx \Delta t_{g,j,j+1} = \frac{v_{g,j+1} - v_{g,j}}{a_{g,j+1}} \quad (5)$$

式中： $t_{g,j+1}$ 为列车 $g$ 在位置 $j+1$ 处的通过时刻，数值上近似等于列车在当前距离间隔 $(j, j+1)$ 内的运行时间， $\text{s}$ 。

## 2 列车运行态势推演方法

根据节时—最优节能驾驶策略和列车运行态势信息计算，研究列车运行态势离线推演方法，用于计算正常无限速运营条件下的列车运行态势历史信息。之后，根据专家知识规则和历史信息，提出区域临时限速下的列车运行态势在线推演方法，为调度员实时预测列车在区间的运行态势。根据安全运行要求，当列车尾部完全离开临时限速区段时，列车才能在当前无限速区段提速，故推演列车运行态势信息时，需考虑列车长度的影响。

### 2.1 离线推演方法

传统的列车运行态势推演通常采用离线推演方法<sup>[1]</sup>。列车运行态势离线推演方法如图2所示。图2中，限速区段包括站内限速区段、无限速区段，以及由于突发事件影响而设置的临时限速区段 $k$ 。具体计算过程如下。

步骤1：从各限速区段的左边界点出发，计算列车在最大牵引—巡航曲线，若列车在最大牵引下的速度大于限速值，则仅施加一部分牵引力，使列车处于巡航工况。

步骤2：从各限速区段的右边界点出发，计算列车在最大制动—巡航曲线，若列车在最大制动下的速度大于限速值，则仅施加一部分制动力，使列车处于巡航工况。

步骤3：列车在离线推演方法下各位置处的实际速度取步骤1和步骤2两条曲线中速度的最小值，再根据1.2节计算列车在各位置处的运行时间和牵引能耗等参数。

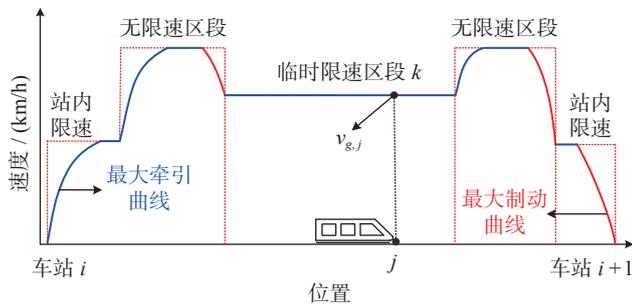


图2 列车运行态势离线推演方法

Fig.2 Offline deductive approach of train operation situation

## 2.2 在线推演方法

由2.1节可知，列车在离线推演下的运行态势信息计算过程需要3次遍历区间内各位置点，计算效率较低。为此，充分利用正常无限速运营条件下的列车运行态势历史信息，基于专家知识规则，提出列车运行态势在线推演方法，列车运行态势在线推演方法如图3所示，计算过程如下。

步骤1：存储无限速运营条件下的列车运行态势历史信息  $v_{g,j}^{off}$ ，其中，列车  $g \in \{1, 2, \dots, G\}$ ，位置  $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ 。

步骤2：令列车  $g$  在临时限速区段  $k$  的限速值为  $\hat{v}^k$ ，左、右边界点  $x_{left}^k$  和  $x_{right}^k$  的实际速度值分别为  $v_{g,left}^{on}$  和  $v_{g,right}^{on}$ ，并令  $v_{g,left}^{on} = v_{g,right}^{on} = \hat{v}^k$ 。

步骤3：基于专家知识规则在线计算列车运行态势信息，具体如下。①从临时限速区段左边界点  $x_{left}^k$  开始至  $(x_{left}^k - \Delta j_{coast})$ ，计算列车在惰行下的运行态势信息；从  $(x_{left}^k - \Delta j_{coast})$  开始直至  $v_{g,j}^{off} - v_{g,j}^{on} < \Delta v_{coast}$ ，计算列车在最大制动下的运行态势信息；从  $v_{g,j}^{off} - v_{g,j}^{on} < \Delta v_{coast}$  开始直至  $v_{g,j}^{on} > v_{g,j}^{off}$ ，计算列车在惰行下的运行态势信息。其中，转换惰行距离  $\Delta j_{coast}$ ，转换惰行速度差  $\Delta v_{coast}$  均由专家知识规则决定。②从临时限速区段的左边界点  $x_{left}^k$  开始至右边界点  $x_{right}^k$ ，计算列车在巡航工况下的运行态势信息，巡航速度为  $\hat{v}^k$ 。③从  $x_{right}^k$  开始直至  $v_{g,j}^{on} > v_{g,j}^{off}$ ，计算列车在最大牵引下的运行态势信息。

步骤4：在其他未受临时限速影响的位置，列车直接读取历史信息  $v_{g,j}^{off}$ 。

由上述步骤可知，相较于离线推演方法<sup>[1]</sup>，在线推演方法仅需计算实际受临时限速影响位置处的运行态势信息，即图3中阴影区域部分，不需要计算列车在全部区间的运行态势信息，由此提升列

车运行态势推演计算效率。另外，应用专家知识规则在制动与其他工况之间增加惰行工况，保证推演驾驶策略的合理性。

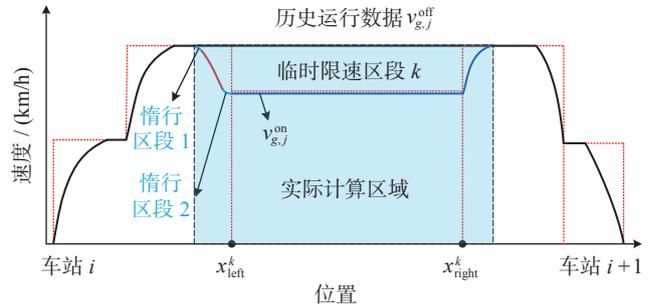


图3 列车运行态势在线推演方法

Fig.3 Online deductive approach of train operation situation

## 3 仿真实例

### 3.1 仿真输入

以京津城际铁路(北京南—天津)某日下行6:00—7:00的计划运行图为例进行仿真分析，动车组选择8辆编组的CR400BF，列车参数如表1所示。牵引和制动特性曲线详见文献[10]。线路总长度为117 040 m，站内限速为80 km/h。临时限速情形下，限速区段为京津城际铁路K40至K59+791区段，限速值为200 km/h。受临时限速影响的列车为6:20从北京南始发的列车。距离步长  $\Delta j$  设置为1 m, 10 m, 100 m。专家知识规则下  $\Delta j_{coast} = 800$  m,  $\Delta v_{coast} = 1$  m/s。基于C++语言，并在配置为Intel Xeon Gold 5218 CPU@2.30GHz, 32.0GB RAM的电脑上，对列车运行态势进行离线和在线的仿真推演。

表1 列车参数

Tab.1 Train parameters

参数	数值
列车质量 $m$ / kg	501 000
列车长度 / m	209
最大速度 $v_{max}$ / (km/h)	350
最大加速度 $a_{max}$ / (m/s <sup>2</sup> )	1
最大冲击率 $\delta_{max}$ / (m/s <sup>3</sup> )	0.5

### 3.2 仿真结果分析

因距离步长  $\Delta j$  对列车运行态势推演的求解时间影响较大，故首先对  $\Delta j$  进行灵敏度分析，用于

选择能同时保证求解效率和质量的最佳  $\Delta j$  取值。针对无限速运营条件，采用离线推演方法计算区间运行时间、牵引能耗和求解时间等指标，距离步长的灵敏度分析结果如表 2 所示。由表 2 可知， $\Delta j = 10 \text{ m}$  下的区间运行时间和牵引能耗，与  $\Delta j = 1 \text{ m}$  下对应结果的误差分别仅为 1.16 s 和 1.42 kW·h，但求解效率提升了约 10 倍。尽管  $\Delta j = 100 \text{ m}$  求解时间不到 2 s，但区间运行时间与  $\Delta j = 1 \text{ m}$  的结果相差近 13 s，误差较大。故选择 10 m 的距离步长能同时保证高效的求解精度和效率。

表 2 距离步长的灵敏度分析结果

Tab.2 Sensitivity analysis results of the distance step

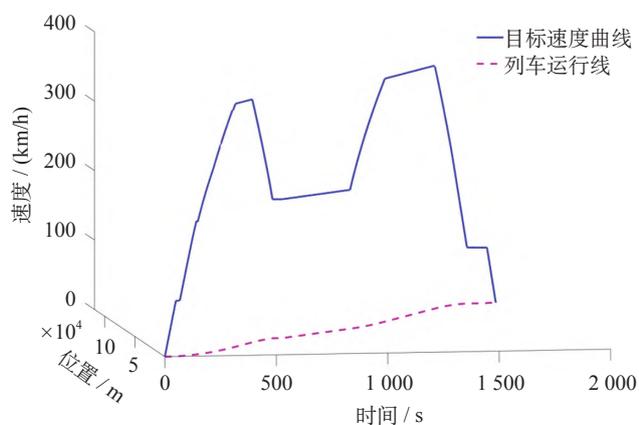
$\Delta j / \text{m}$	区间运行时间 / s	牵引能耗 / (kW·h)	求解时间 / s
1	1 545.44	1 374.92	157.41
10	1 544.28	1 373.50	15.48
100	1 532.65	1 363.70	1.42

针对临时限速情形，选择  $\Delta j = 10 \text{ m}$ ，计算离线和在线推演方法下的区间运行时间、牵引能耗和求解时间，离线和在线推演方法下的仿真结果如表 3 所示。由表 3 可知，相较于离线推演方法，在线推演方法利用离线推演下的历史信息，减小列车晚点时间 35.07 s 的同时，降低牵引能耗 1.06%，计算效率提升了约 20 倍。

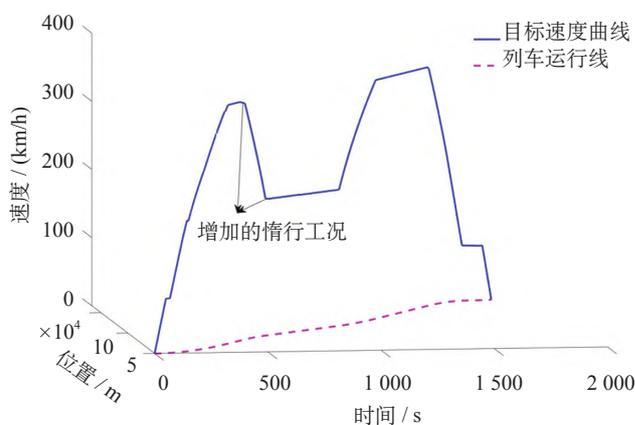
表 3 离线和在线推演方法下的仿真结果

Tab.3 Simulation results under the offline and online deduction approaches

方法	区间运行时间 / s	牵引能耗 / (kW·h)	求解时间 / s
离线推演	1 800.56	1 726.26	16.79
在线推演	1 765.49	1 707.93	0.83



a 离线推演方法  
a Offline deduction approach



b 在线推演方法  
b Online deduction approach

图 4 离线和在线推演方法下的列车运行态势

Fig.4 Train operation situation under the offline and online deduction approaches

离线和在线推演方法下的列车运行态势如图 4 所示，可通过目标速度曲线和列车运行线表征，相较于图 4a 离线推演方法，图 4b 在线推演方法通过增加惰行工况，满足工况转换约束的同时，降低牵引能耗。同时，图 4b 也能够为调度员预测列车在区间内的加减速情况。

在线推演方法下受临时限速影响列车在各站的晚点时间如表 4 所示。同时，在线推演方法能够给出运行图调整结果，运行图调整结果如图 5 所示。图 5 中，虚线和实线分别表示计划运行图和阶段调整计划下的实绩运行图，受临时限速影响的列车为图 5 中的第一列列车，该列车根据在线推演方法调整在后续车站的接发车时刻。后续列车根据最小区间运行时间和最小区间追踪间隔时间，调整实际接发车时刻。图 5 可作为最终的运行图调整结果，直接实时下发至线路各列车。在线推演方法可实时给出阶段计划调整方案，调度员仅需人工确认该方法给出的调整方案是否可行，而不需要再对运行图进行调整。由此可见，在线推演方法能有效减少调度员人工调整运行图的次数，实现了阶段计划的自动调整，减轻了调度员调整阶段计划的工作强度。

#### 4 结束语

针对区域临时限速情形，建立列车运行态势推演模型，利用列车运行态势历史信息和专家知识规则，提出列车运行态势在线推演方法，相较于

表 4 在线推演方法下受临时限速影响列车在各站的晚点时间  
Tab.4 Delay of the influenced train at each station under temporary speed restriction in the online deduction approach

车站	车站公里标 / m	列车晚点时间 / s
北京南	1 105	0
亦庄	22 285	0
永乐	46 565	71.322
武清	84 454	221.21
南仓线路所	107 969	221.21
天津	118 144	221.21

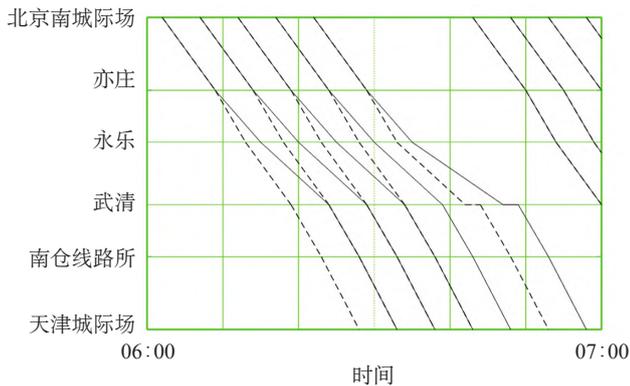


图 5 运行图调整结果

Fig.5 Results of the rescheduled timetable

离线推演方法，在线推演通过合理的运行工况转换能有效减小列车总晚点和牵引能耗，提升了约 20 倍的求解效率，增加惰行工况保证了驾驶策略的合理性，为调度员实时提供列车在后续区间的运行速度、时间等运行态势信息，预测列车在后续车站的到站晚点时间，辅助调度员调整阶段计划，能有效减少调度员人工调整运行图的次数，通过自动调整阶段计划减轻了调度员的工作强度。未来将研究多车追踪场景下的列车运行态势实时推演方法，考虑列车目标速度曲线与运行图的一体化协同调整，分析列车运行态势与进路计划之间的耦合关系。

参考文献:

[1] 闫璐, 张琦, 王荣笙, 等. 基于动力学特性的列车运行态势分析[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(8): 64-70.  
YAN Lu, ZHANG Qi, WANG Rongsheng, et al. Train Operation Analysis Based on Dynamics[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(8): 64-70.

[2] LIU W, SU S, TANG T, et al. A DQN-based Intelligent

Control Method for Heavy Haul Trains on Long Steep Downhill Section[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021(129): 103249.

[3] LI Z, CHEN L, ROBERTS C, et al. Dynamic Trajectory Optimization Design for Railway Driver Advisory System[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018, 10(1): 121-132.

[4] YIN J, CHEN D, LI L. Intelligent Train Operation Algorithms for Subway by Expert System and Reinforcement Learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2561-2571.

[5] Wang P, Trivella A, Goverde R M P, et al. Train Trajectory Optimization for Improved on-time Arrival under Parametric Uncertainty[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020(119): 102680.

[6] 孔繁鑫, 陈阳舟, 詹璟原, 等. 基于离散动态规划的列车节能速度曲线优化[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(8): 113-118.  
KONG Fanxin, CHEN Yangzhou, ZHAN Jingyuan, et al. Optimization of Train Energy-saving Speed Curve Based on Discrete Dynamic Programming[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(8): 113-118.

[7] SU S, LI X, TANG T, et al. A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-efficient Operation Strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 883-893.

[8] 彭俊彬, 刘刚. 动车组牵引与制动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.

[9] HOWLETT P. An Optimal Strategy for the Control of a Train[J]. The Journal of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics, 1990, 31(4): 454-471.

[10] 陈雷. 基于牵引仿真的高速铁路列车追踪间隔时间的计算[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

收稿日期: 2021-12-30

通信作者: 张琦(1968—), 男, 上海人, 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。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1834211); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2021X001); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2021YJ043)

责任编辑: 白箏