

文章编号: 1003-1421(2021)08-0064-07 中图分类号: U284.4; U260 文献标识码: A
DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2021.08.11

基于动力学特性的列车运行 态势分析

Train Operation Analysis Based on Dynamics

闫璐¹, 张琦², 王荣笙^{1,2}, 丁舒忻²

YAN Lu¹, ZHANG Qi², WANG Rongsheng^{1,2}, DING Shuxin²

(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: 针对区间临时限速下的列车运营场景, 提出考虑列车动力学特性的列车运行态势分析方法。建立临时限速区域下区间运行时分、运行速度和追踪列车间隔时间等列车运行约束, 根据列车最大牵引和最大制动特性, 计算在限速区间的运行时分, 以及在站内限速、无限速和临时限速 3 个区域边界点的速度和时间等列车运行态势信息。分析晚点时间与区间缓冲时间, 以及发生晚点时列车当前速度与最大制动曲线下速度之间的关系, 预测列车到达前方车站的时刻和晚点时间。仿真结果表明, 针对不同临时限速等级, 根据列车最大牵引和最大制动特性计算得到的列车速度曲线和运行线, 可以为调度员提供列车在限速区间的速度和时间等列车运行态势信息。

关键词: 铁路运输; 列车运行态势; 列车动力学特性; 临时限速

Abstract: Aiming at the train operation scenarios under temporary speed restriction in an interval, the paper proposed an operation analysis approach considering train dynamics. Firstly, train operation constraints were put, including inter-interval running time, running speed, and the time interval between trains spaced by automatic block signals in an area with a temporary speed restriction. According to the train's maximum traction and braking characteristics, the paper calculated the running time in the interval with speed restriction and the running speed and time at boundary points among three regions, which are subject to speed restriction at stations and temporary speed restriction and free of restriction, respectively. Then the delay and interval recovery time were analyzed, and the relationship between the current train speed and the speed under the maximum braking curve was also considered when the delay occurred. On this basis, the arrival and delay time of the train at the front station was predicted. The simulation results show that with different temporary speed restrictions, the vehicle speed curve and running line are derived under the condition of maximum traction and braking characteristics. The research can provide dispatchers with information about the operational situation including train speed and time in the interval with a speed restriction.

Keywords: Railway Transportation; Train Operation Analysis; Train Dynamics; Temporary Speed Restriction

0 引言

列车运行准点率是评价铁路运营管理质量的重要指标之一，在一定程度上间接影响旅客的出行选择。当列车遭遇自然因素或设备故障等突发事件时，临时设置的区间或车站封锁将不同程度地影响列车的正常运行，而准确、及时的列车运行态势信息是调度员做出科学、合理决策的重要基础。列车运行态势可归结为在当前时刻发生突发事件后，受晚点影响的列车在后续区间和车站的运行时分和速度。预测列车运行态势可以使调度员从微观层面了解列车在未来一段时间内的运行信息，辅助列车调度员编制更加准确、合理的列车运行调整方案，因而复杂线路条件下的列车运行态势分析方法将是铁路运输组织和列车运行调整的关键问题之一。同时，分析列车在后续车站和区间的速度和时间等运行态势信息，对晚点时间的客观、准确预测具有重要作用。

列车晚点时间是列车运行态势最显著的表征信息之一，列车晚点预测问题主要通过运筹学模型和数据驱动方法求解，前者包括 Petri 网^[1]、极大如代数理论^[2]、图模型^[3]等方法。近年来，由于机器学习和大数据等前沿理论技术的发展，随机森林^[4]、神经网络^[5-6]、支持向量机^[7]、贝叶斯网络^[8]和 Logistic 回归模型^[9]等数据驱动方法逐渐得到理论和实验验证。这些研究大多从铁路车站或者路网结构的角度，分析初始晚点、连带晚点与运行图缓冲时间之间的关系，而从列车运行状态的微观角度，考虑晚点情形下列车速度和转换工况对运行图调整影响，分析车站和区间的列车运行态势演化过程的研究较少。因此，针对区间临时限速场景下不同临时限速等级对列车晚点的影响，从列车牵引制动特性角度预测列车的晚点时间和区间运行时分，可为调度员运行调整决策提供列车速度、位置等列车运行态势微观信息，增强决策的优化程度和可执行性，从而改善列车运行调整的精细化程度，提升调度工作质量。

1 区间临时限速下的列车运行约束

1.1 临时限速场景

日常运营过程中，高速列车遇到大风、接触网故障停电或者地震等突发事件时，调度员将下达限速命令，使受到影响的列车及时降速或停车，而限速命令下达后，调度员难以及时、准确地掌握各列车未来的运行状态和运行态势，只能大致估计各列车的区间运行时分，据此调整后续各列车在各车站的到发时刻。区间临时限速下的列车运行场景如图 1 所示。由图 1 可知，受到某突发事件的影响，列车调度员在区间 $(j, j+1)$ 中的区域 $(r, r+1)$ 设置了临时限速。已经进入该区间的列车 i 收到调度员的限速命令后，需要及时降速运行，因而列车在区间的运行时分将发生变化。此时，调度员无法及时、准确地评估该列车到达车站 $j+1$ 的时刻。为此，针对区间临时限速场景，结合列车牵引制动特性，计算列车晚点时间和区间运行时分，提出基于列车动力学特性的列车运行态势分析方法，根据列车动力学方程推算列车晚点时间和区间运行时分。

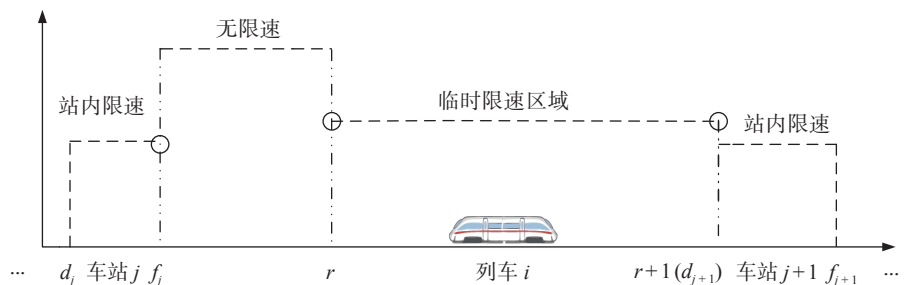


图 1 区间临时限速下的列车运行场景

Fig.1 Train operation scenarios under a temporary speed restriction

作出以下假设：①区间临时限速区域中，临时限速等级和限速区域长度不变，线路上运行的列车数量不变；②由于受突发事件影响的列车难以完全贴合临时限速运行，因而假设临时限速区域内列车实际运行速度不高于临时限速值。

由图 1 可知，列车 i 在经过临时限速区域 $(r, r+1)$ 时，由于限速产生的部分晚点，可以被铺画计划运行图时所预留的缓冲时间吸收，缓冲时间的计算公式为

$$r_{i,j,j+1} = \bar{\sigma}_{i,j,j+1}^{\min} \cdot \alpha \quad (1)$$

式中： $r_{i,j,j+1}$ 为列车 i 在区间 $(j, j+1)$ 的缓冲时间， \min ； $\bar{o}_{i,j,j+1}^{\min}$ 为图定最小区间运行时分， \min ； α 为计算缓冲时间的系数。欧洲和北美地区铁路对该系数的取值一般从 3%~8% 不等^[11]，根据我国铁路路情，设置 α 为 5%。

列车的实际区间运行时分可以在区间缓冲时间的基础上消除一部分晚点计算得到，计算公式为

$$o_{i,j,j+1} = d_{i,j+1} - f_{i,j} + v_{i,j+1} - r_{i,j,j+1} \quad (2)$$

式中： $o_{i,j,j+1}$ 为列车的实际区间运行时分， \min ； $d_{i,j+1}$ 为列车 i 在车站 $j+1$ 的图定到达时刻； $f_{i,j}$ 为列车 i 在车站 j 的图定出发时刻； $v_{i,j+1}$ 为列车 i 在车站 $j+1$ 的晚点时间， \min 。

列车在临时限速区域的实际运行时分通过连续 2 个位置点速度倒数对位移的积分，计算公式为

$$t_{i,l}^{j,r} = \int_{x_r}^{x_{r+1}} \frac{1}{v_{i,j}^{l,r}} dx \quad (3)$$

式中： l 为临时限速区域 $(r, r+1)$ 内设置的临时限速等级； $t_{i,l}^{j,r}$ 为列车 i 在该临时限速区域内的实际运行时分， s ； x_r 和 x_{r+1} 分别表示列车在该区域内连续通过的 2 个位置点。 $v_{i,j}^{l,r}$ 为列车 i 在区域 $(r, r+1)$ 的实际运行速度， m/s 。限速值 $v_{i,j}^{l,r}$ 下列车按照临时限速等级 l 行驶的最小运行时分 $t_{i,l}^{j,r}$ 的计算公式为

$$t_{i,l}^{j,r} = \int_{x_r}^{x_{r+1}} \frac{1}{v_j^{l,r}} dx \quad (4)$$

根据假设②有 $v_{i,j}^{l,r} \leq v_j^{l,r}$ ，因而 $t_{i,l}^{j,r} \geq t_j^{l,r}$ 。

1.2 限速区间的追踪列车间隔时间

列车的限速区间是指包含临时限速区域的站间区间 $(j, j+1)$ 。限速区间内，任意相邻 2 列车 i 和 $i+1$ 的追踪间隔时间 $t_{i,i+1,j}^x$ 需要满足以下约束。

$$t_{i,i+1,j}^x = t_{i,i}^x - t_{i+1,j}^x \geq t_{i,i+1,j}^{\min} \quad (5)$$

$$t_{i,j}^x = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{1}{v_{i,j}^x} dx \quad (6)$$

$$t_{i+1,j}^x = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{1}{v_{i+1,j}^x} dx \quad (7)$$

$$x_{j+1} - x_j = \eta \quad (8)$$

式中： $t_{i,j}^x$ 和 $t_{i+1,j}^x$ 分别表示列车 i 和 $i+1$ 在区间 $(j, j+1)$ 内任意点 x 的通过时刻， $t_{i,i+1,j}^{\min}$ 表示最小追踪列车间隔时间， s 。列车在区间任意点 x 的通过时刻，由列车通过连续 2 个位置点 x_j 和 x_{j+1} 积分逼近得到，参数 η 取 1 m。

1.3 列车动力学模型

列车 i 在最大牵引力 F_{\max} 或最大制动力 B_{\max} 下的加速度 $a_{i,j}^x$ 的计算公式为

$$a_{i,j}^x = \frac{[n_F F_{\max} - n_B B_{\max} - R(v_{i,j}^x) - G(x)]}{m_i v_{i+1,j}^x} \quad (9)$$

式中： m_i 为列车质量， kg ； $v_{i,j}^x$ 为列车 i 在区间 $(j, j+1)$ 运行时任意点 x 的速度， m/s ； n_F 和 n_B 分别为最大牵引和最大制动 2 种工况的选择性参数，取值在 0 和 1 之间。当 n_F 为 1， n_B 为 0 时，列车选择最大牵引加速；当 n_F 为 0， n_B 为 1 时，列车选择最大制动减速。

$R(v)$ 和 $G(x)$ 分别表示列车的基本阻力和坡道附加阻力，计算公式为

$$R(v_i) = \delta_1 (v_{i,j}^x)^2 + \delta_2 v_{i,j}^x + \delta_3 \quad (10)$$

$$G(x) = \frac{m_i \cdot 9.8 \cdot d(x)}{1\ 000} \quad (11)$$

式中： δ_1 ， δ_2 和 δ_3 是与基本阻力有关的常数，与列车类型有关； m_i 为列车质量， kg ；9.8 为重力加速度， N/kg ；坡道附加阻力 $G(x)$ ， N ，受线路坡度 $d(x)$ 影响。

2 基于动力学特性的列车运行态势分析方法

根据区间临时限速下的列车运行约束和列车的动力学模型，计算列车在限速区间内各区域的运行时分，进而预测列车在整个限速区间的运行时分和晚点时间，可以为调度员提供列车运行态势信息，辅助调整列车运行。相比于从中心调度台的宏观运行图上粗略估计实际区间运行时分，采用基于动力学特性的列车运行态势分析方法可以更加准确地从列车动力学特性的角度分析列车的微观运行态势，使调度员可以准确掌握列车通过临时限速区域后，最早到达前方车站的时刻，以告知列车是否可以通过加速“赶点”消除一部分晚点。

2.1 限速区间内列车运行态势分析方法

图 1 中，限速区间包括站内限速区域 (d_j, f_j) 和 (d_{j+1}, f_{j+1}) 、无限速区域 (f_j, r) 和临时限速区域 $(r, r+1)$ 。临时限速区域的限速值和限速范围需要根据突发事件的大小和影响范围设置。在限速区间运行时，列车在各区域边界点的速度、时间以及在限速区间的运行时分等列车运行态势信息是未知的，可

以按以下步骤，根据列车动力学特性进行分析预测。

步骤 1：以站内限速区域、无限速区域和临时限速区域的左边界点为开始点，根据 1.3 节列车动力学模型，计算列车 i 的最大牵引曲线，以及该曲线下列车在各左边界点的速度 $v_{i,j}^{F,x}$ ，其中左边界点 $x = d_j, f_j, r, d_{j+1}$ 。

步骤 2：以站内限速区域、无限速区域和临时限速区域的右边界点为开始点，根据 1.3 节列车动力学模型计算列车 i 的最大制动曲线，以及该曲线下列车在各右边界点的速度 $v_{i,j}^{B,x}$ ，其中右边界点 $x = f_j, r, r+1, f_{j+1}$ 。

步骤 3：取列车 i 在限速区间各区域边界点的速度为最大牵引下的速度、最大制动下的速度和限速值三者的最小值，即 $v_{i,j}^x = \min\{v_{i,j}^{L,x}, v_{i,j}^{F,x}, v_{i,j}^{B,x}\}$ ，其中 $v_{i,j}^{L,x}$ 表示列车 i 在区间 $(j, j+1)$ 限速等级 l 下的限速值。

步骤 4：根据时间、速度和加速度关系计算列车按照最大牵引和最大制动在限速区间各区域边界点 x 的时间、速度和加速度。

由此计算出按照动力学特性在限速区间各区域的时间、速度和加速度等列车运行态势信息。保证列车合理运行工况的同时，使列车可以通过加速以消除部分晚点。此外，假定列车在限速区间按照“最大牵引—巡航—最大制动”模式运行，该模式下列车的最小区间运行时分 $o_{i,j,j+1}^{\min}$ 为列车在各区域最小运行时分之和，计算公式为

$$o_{i,j,j+1}^{\min} = \frac{2(x_{f_j} - x_{d_j})}{v_{i,j}^{f_j} + v_{i,j}^{d_j}} + \frac{2(x_r - x_{f_j})}{v_{i,j}^r + v_{i,j}^{f_j}} + \frac{2(x_{r+1} - x_r)}{v_{i,j}^{r+1} + v_{i,j}^r} + \frac{2(x_{f_{j+1}} - x_{r+1})}{v_{i,j}^{f_{j+1}} + v_{i,j}^{r+1}} \quad (12)$$

2.2 列车晚点预测方法

列车在晚点情况下可以利用区间缓冲时间，通过牵引加速运行，消除一部分晚点。根据发生晚点时各列车在当前限速区间已运行时分，计算列车在限速区间的剩余部分能否通过区间缓冲时间消除晚点，具体步骤如下。

步骤 1：根据 1.3 节计算得到的列车最大牵引和最大制动特性下的曲线，已知发生晚点时，列车 i 在各自位置 h_i 处的时刻 $t_{i,j}^{h_i}$ ，设列车 i 在区间的剩余部分运行分为 $o_{i,j,j+1}^{h_i}$ ；

步骤 2：列车在区间的剩余部分能否利用区间缓冲时间消除晚点，取决于列车在位置 h_i 处发生晚点时的速度 $v_{i,j}^{h_i}$ 与在最大制动曲线下速度 $v_{i,j}^{B,h_i}$ 之间的关系；

当 $v_{i,j}^{h_i} < v_{i,j}^{B,h_i}$ 时，列车有足够的时间采用合理的工作转换序列，在到达下一车站前恢复正点。此时，调度员可以按照图定到站时刻，为列车安排进入下一车站的到站作业；

当 $v_{i,j}^{h_i} = v_{i,j}^{B,h_i}$ 时，列车需要在当前位置点立刻加速至最大制动速度，使用全部区间缓冲时间才能恢复正点。但是，考虑到司机和列车设备的反应时间、旅客舒适度、列车节能等因素，列车在当前区间的剩余部分难以通过合理工况在到达下一车站恢复正点，实际运行将产生一部分晚点；

当 $v_{i,j}^{h_i} > v_{i,j}^{B,h_i}$ 时，列车在区间剩余部分的区间缓冲时间作用下难以消除所有晚点，实际运行时分 $o_{i,j,j+1}^{h_i}$ 由公式 (12) 计算得到，列车 i 在到站 j 时将产生额外的晚点时间 $v_{i,j+1}$ ，并传播其后行列车 $i+1$ ，其连带晚点为 $v_{i+1,j+1}$ 。

步骤 3：基于 $v_{i,j}^{h_i}$ 和 $v_{i,j}^{B,h_i}$ 的关系，在区间的剩余部分利用区间缓冲时间 $r_{i,j,j+1}$ 消除一部分或者全部晚点，列车 i 到达下一车站 $j+1$ 的时刻和晚点时间的计算公式为

$$d_{i,j+1} = t_{i,j}^{h_i} + o_{i,j,j+1}^{h_i} - r_{i,j,j+1} \quad (13)$$

$$v_{i,j+1} = d_{i,j+1} - \bar{d}_{i,j+1} \quad (14)$$

式中： $\bar{d}_{i,j+1}$ 表示列车 i 在车站 $j+1$ 的图定到站时刻。

3 仿真实例

3.1 仿真输入

以京沪高速铁路北京南—济南西区段某日下行的计划运行图为例进行仿真分析。动车组型号为 CRH380 型，列车牵引制动特性参数如表 1 所示。根据列车在各站间区间图定的最小区间运行时分，其区间缓冲时间分别为 1 min, 0.86 min, 1.05 min, 1.24 min, 1.14 min 和 0.81 min。限速区间的临时限速区域设置大风报警场景，根据高速铁路非正常行车应急处置预案，不同风速等级下列车临时限速如表 2 所示。设置 4 种临时限速场景（不考虑扣停列车），分别为无限速、限速 300 km/h、限速 200 km/h 和限速 120 km/h。限速区域设置为廊坊

至天津南之间的 99 km 至 131 km, 受临时限速影响列车的时刻表如表 3 所示。

表 1 列车牵引制动特性参数

Tab.1 Parameters of train traction and braking characteristics

参数	数值
列车质量 m_l / t	419.6
二次项系数 $\delta_1 / (N \cdot s^2 / (m^2 \cdot kg))$	0.000 124
一次项系数 $\delta_2 / (kN \cdot s / (m \cdot kg))$	0.000 4
常数项 $\delta_3 / (N / kg)$	0.36
最大牵引力 F_{max} / kN	238.8
最大制动力 B_{max} / kN	234

3.2 仿真结果分析

根据以上 4 种临时限速场景, 计算受临时限速影响列车的最大牵引和最大制动曲线下的列车速度曲线和列车运行线。临时限速场景下列车速度曲线如图 2 所示, 临时限速场景下列车运行线如图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知, 该列车在限速区间各区域边界点的速度、时间等列车运行态势信息。临时

表 2 不同风速等级下列车临时限速

Tab.2 Temporary speed restriction of trains at different wind velocities

大风报警	风速等级 / 级	限速等级 /	限速值 / (km/h)
绿色无预警	<7	0	(不限速)
蓝色预警	7	1	300
黄色预警	8~9	2	200
橙色预警	10	3	120
红色预警	11	4	(扣停列车)

表 3 受临时限速影响列车的时刻表

Tab.3 Train timetable influenced by a temporary speed restriction

车站	公里标 / km	到达时刻	出发时刻
北京南	0	12:30	12:30
廊坊	59	12:51	12:53
天津南	131	13:11	13:13
济南西	406	14:16	14:18

限速等级越高, 列车在限速区间的运行速度越低, 列车到达下一站天津南的晚点时间越大。计算第 45 列车在 4 种临时限速场景下的晚点时间分别为 0 (无限速)、0.73 min, 3.43 min 和 11.79 min。

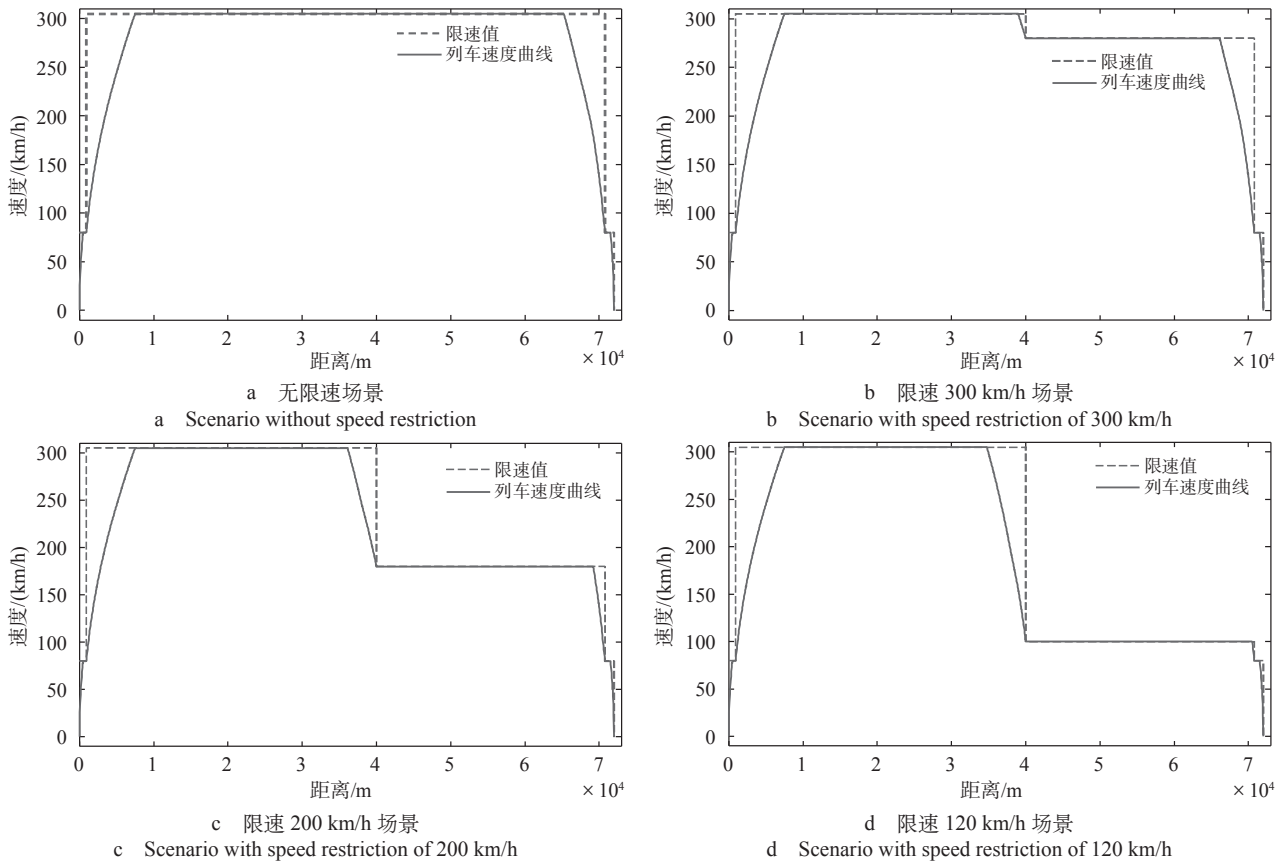


图 2 临时限速场景下列车速度曲线

Fig.2 Train speed curves under a temporary speed restriction

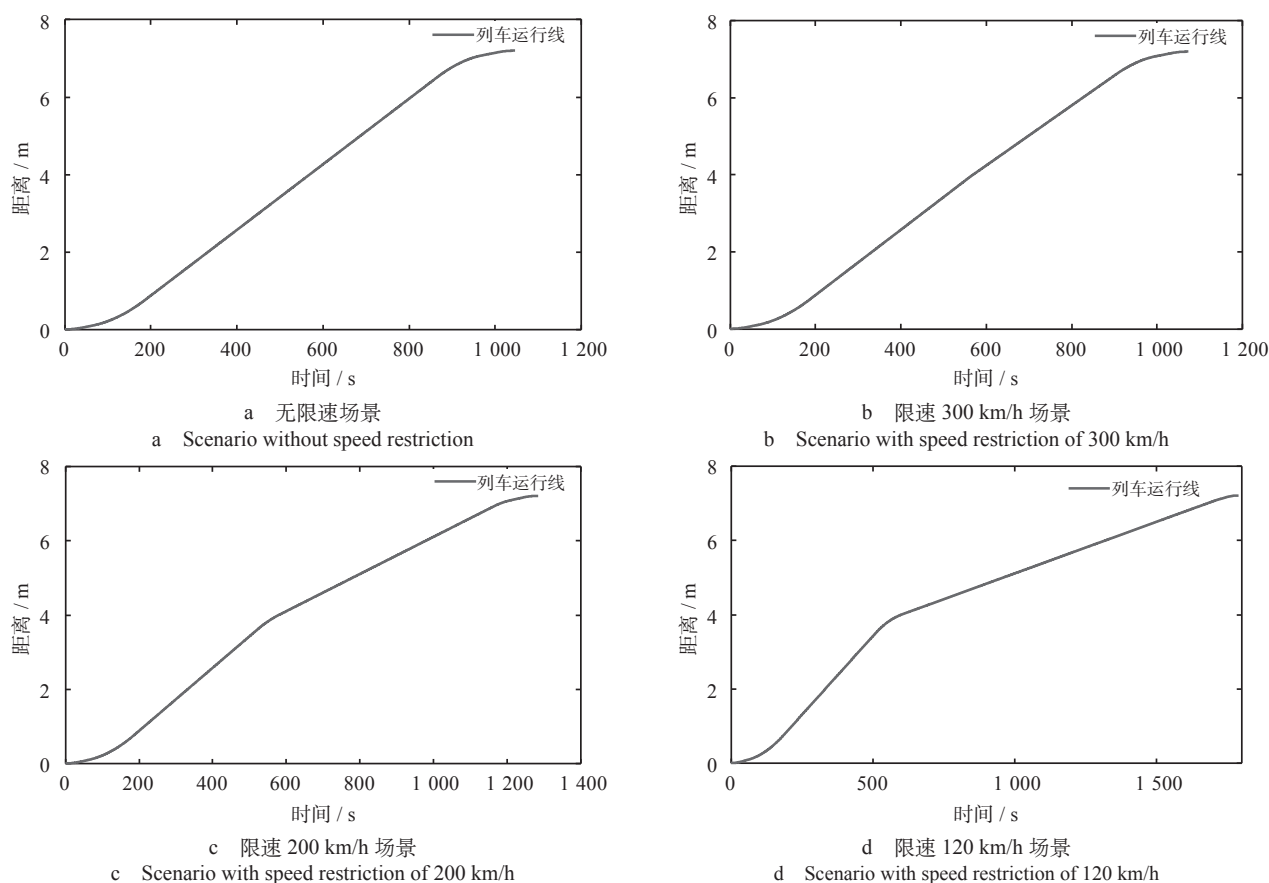


图3 临时限速场景下列车运行线

Fig.3 Train paths under a temporary speed restriction

根据6个站间的区间缓冲时间与4种临时限速场景下晚点时间之间的关系，讨论区间缓冲时间能否完全消除晚点，以及需要采取的调整策略。对于临时限速场景2，第45列车的晚点时间(0.73 min)可以被廊坊至天津南的区间缓冲时间消除(0.86 min)。对于限速场景3，该站间的晚点时间虽然在列车到达天津南站时不能完全消除，但可被后续站间区间的缓冲时间消除，当列车到达济南西站时，仍然不会产生晚点，不需要采取调整策略。对于临时限速场景4，后续所有站间区间的缓冲时间难以消除晚点，则需要调度员采取策略调整列车到达和出发时刻。

4 结束语

针对区间临时限速运营场景，提出考虑动力学特性的列车运行态势分析方法，通过比较预测晚点时间与区间缓冲时间的关系，判断列车能否通过“赶点”运行，在后续站间恢复正点，进而推测是否需要采取调整策略使列车正点运行。另一方面，

根据最大牵引和最大制动下限速区间内的列车速度曲线和运行线，可计算得到列车在各限速区域内的速度和时间，为调度员调整列车运行图提供晚点输入和列车运行态势信息等。将来除了考虑区间缓冲时间作为吸收列车区间晚点的功能性指标以外，还需要研究车站缓冲时间、连带晚点与初始晚点之间更深层次之间的关系。

参考文献:

[1] GOVERDE R M P. Railway Timetable Stability Analysis Using Max-plus System Theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(2): 179–201.
 [2] MILINKOVIĆ S, MARKOVIĆ M, VESKOVIĆ S, et al. A Fuzzy Petri Net Model to Estimate Train Delays[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2013, 33: 144–157.
 [3] BÜKER T, SEYBOLD B. Stochastic Modelling of Delay Propagation in Large Networks[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2012, 2(1–2): 34–50.

- [4] 袁志明, 张琦, 黄康, 等. 基于随机森林的列车到站时间预测方法[J]. 铁道运输与经济, 2016, 38(5): 60-63, 79. YUAN Zhiming, ZHANG Qi, HUANG Kang, et al. Forecast Method of Train Arrival Time based on Random Forest Algorithm[J]. Railway Transport and Economy, 2016, 38(5): 60-63, 79.
- [5] ONETO L, FUMEO E, CLERICO G, et al. Dynamic Delay Predictions for Large-Scale Railway Networks: Deep and Shallow Extreme Learning Machines Tuned via Threshold out[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(10): 2754-2767.
- [6] 张琦, 陈峰, 张涛, 等. 高速铁路列车连带晚点的智能预测及特征识别[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2251-2259. ZHANG Qi, CHEN Feng, ZHANG Tao, et al. Intelligent Prediction and Characteristic Recognition for Joint Delay of High Speed Railway Trains[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(12): 2251-2259.
- [7] BARBOUR W, MORI J C M, KUPPA S, et al. Prediction of Arrival Times of Freight Traffic on US Railroads Using Support Vector Regression[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018(93): 211-227.
- [8] HUANG P, LESSAN J, WEN C, et al. A Bayesian Network Model to Predict the Effects of Interruptions on Train Operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020(114): 338-358.
- [9] 石晶, 彭其渊, 文超, 等. 铁路列车晚点时间预测方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(7): 33-39. SHI Jing, PENG Qiyuan, WEN Chao, et al. Prediction Method of Passenger Train Delay Propagation[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(7): 33-39.
- [10] HANSEN I A, PACHL J, ALBRECHT T, et al. Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling, Simulation[M]. Eurail Press, 2008.

收稿日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1834211, U1934220); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2020YJ225)

责任编辑: 廖文

(上接第57页)

- 特征的典型零部件识别[J]. 信息与控制, 2017, 46(3): 358-364. ZHANG Zhijia, WEI Xin, ZHOU Ziqiang, et al. Recognition of Typical Components Based on Edge Features of Depth Image and Point Cloud[J]. Information and Control, 2017, 46(3): 358-364.
- [11] 彭玉清, 李木, 高晴晴, 等. 基于动态模板匹配的移动机器人目标识别[J]. 传感技术学报, 2016, 29(1): 58-63. PENG Yuqing, LI Mu, GAO Qingqing, et al. Mobile Robot Target Recognition Based on Dynamic Template Matching[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(1): 58-63.
- [12] 田杰, 张骁宇. 基于遗传蚁群混合算法的机械臂路径规划[J]. 新型工业化, 2020, 10(1): 55-60. TIAN Jie, ZHANG Xiaoyu. Path Planning of Manipulator Based on Genetic Ant Colony Hybrid Algorithm[J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(1): 55-60.
- [13] 张锟, 韦庆, 常文森. 一种基于力/位混合控制进行插孔作业的策略[J]. 机器人, 2002, 24(1): 44-48. ZHANG Kun, WEI Qing, CHANG Wensen. An Insertion Strategy Based on Force/Position Hybrid Control[J]. Robot, 2002, 24(1): 44-48.
- [14] 杨思燕, 贺国旗, 刘如意. 基于SIFT算法的大场景视频拼接算法及优化[J]. 计算机科学, 2019, 46(7): 286-291. YANG Siyan, HE Guoqi, LIU Ruyi. Video Stitching Algorithm Based on SIFT and Its Optimization[J]. Computer Science, 2019, 46(7): 286-291.
- [15] 夏岩, 刘智, 王俊然. 图像拼接中SURF配准算法的研究[J]. 长沙理工大学学报, 2017, 40(2): 98-101. XIA Yan, LIU Zhi, WANG Junran. Research on Surf Registration Algorithm in Image Mosaic[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2017, 40(2): 98-101.

收稿日期: 2020-12-31

修订日期: 2021-07-10

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2016X003-C); 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2020YJ044, 2019HT04)

责任编辑: 王静