



基于移动闭塞原理的区间中断下列车多策略优化调度方法

张俊杰¹, 胡文峰^{1,2*}, 彭涛¹, 阳春华¹

1. 中南大学自动化学院, 长沙 410083

2. 鹏城实验室, 深圳 518000

* 通信作者. E-mail: wenfenghu@csu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-15; 修回日期: 2020-05-14; 接受日期: 2020-06-05; 网络出版日期: 2021-02-22

国家自然科学基金 (批准号: 61790572, 61803392) 资助项目

摘要 在高铁日常运营中, 地质灾害或设备故障等突发事件导致铁路行车区间中断, 长时间的区间中断通常会导致大面积的列车晚点, 给旅客出行带来极大的延误, 如何在区间中断下对列车进行实时调整是高速铁路调度运行的一项重要课题. 本文针对固定时间的区间中断, 构建了列车运行速度调整和运行图调整的混合整数非线性规划 (mixed integer nonlinear programming, MINLP) 模型. 在该模型中, 除了常见的取消车次和延迟发车调度策略, 还将降速运行策略考虑在内, 在满足行车安全和车站通行能力的约束条件下, 以 3 种调度策略的加权延误影响最小化为目标. 该模型基于列车运动学模型计算列车降速运行带来的延误时间, 并通过移动闭塞原理控制列车运行安全间隔. 本文建立的模型可由商业优化软件 CPLEX 直接求解, 并保证运行调整方案的实时性. 模型还讨论了取消车次、延迟发车和降速运行这 3 种调度策略对总延误时间的影响, 最后以京沪高铁实例进行验证. 验证结果表明该模型是合理有效的, 通过模型求解能对实际问题给出合理的调度方案并提高列车终到正点率.

关键词 高速列车调度, 区间中断, 实时运行调整, 降速运行, 混合整数非线性规划

1 引言

近年来, 随着中国高速铁路的飞跃发展, 中国高速铁路的调度指挥问题变得极为重要. 复杂的列车运行路线, 不断提高的列车运行速度和行车密度等现状也导致列车运行图日趋复杂. 在此情况下, 高速列车之间具有高度的关联性, 外界小的干扰就可能影响大区域内列车的正常运行. 例如, 泥石流等地质灾害, 列车的设备故障均会造成线路中断. 突发事件的干扰会造成列车初始的运行图计划不可用, 致使大面积的列车晚点, 造成严重的社会影响和巨大的经济效益损失, 因此对于区间中断下的列车运行实时调整的研究具有非常重要的现实意义.

引用格式: 张俊杰, 胡文峰, 彭涛, 等. 基于移动闭塞原理的区间中断下列车多策略优化调度方法. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 413–429, doi: 10.1360/SSI-2019-0288
Zhang J J, Hu W F, Peng T, et al. Moving block principle-based multi-strategy optimal scheduling method for trains in case of segment blockages (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 413–429, doi: 10.1360/SSI-2019-0288

由于影响高速列车安全运行的突发事件频繁发生, 区间中断下列车运行的实时调整成为了高速铁路交通运输的热点问题, 引起了国内外众多学者的广泛关注. 国外学者在 20 世纪就开始对列车运行调整问题展开了比较系统的研究. 文献 [1] 在铁路运行调整方面做出了探索性的研究工作, 描述了一种优化单线铁路列车时刻表的模型的开发和使用, 并采用分支定界的方法对模型进行求解. 后续十多年来, 国内外学者对各种类型的列车运行调整问题进行了探索. 文献 [2] 研究了突发事故下交通拥堵控制策略, 建立了一个临时性车辆禁行设计的规划模型. 文献 [3] 对当时已有的铁路运行调整问题的研究工作进行了相关总结, 概述了铁路实时扰动和中断管理的恢复模型和算法, 分析了时刻表、列车和乘务人员重新调度的算法, 以及不同阶段重新调度的算法. 最后, 文献 [3] 从扰动或中断的类型和规模、网络基础设施和拓扑结构、考虑的目标函数和约束以及使用的优化方法等方面解决这些重调度问题. 此外, 对区间中断不同类型的突发事件下的列车运行调整研究也有很大进展. 区间中断可分为铁路双线线路中的单线中断和双线完全中断两种场景, 并且在故障时间已知的假设下, 还可以把铁路运行调整过程划分为 3 个阶段: 从正常运行到非正常运行的过渡阶段, 非正常运行的持续阶段以及从非正常状态恢复正常运行的阶段. 上述这种在高速铁路区间能力受到干扰甚至失效情况下建立的模型还需要考虑相邻列车安全距离, 即固定闭塞区间, 相关研究结果有文献 [4~10]. 值得注意的是, 文献 [5~9] 使用了事件活动网络提取铁路网络动态特征来进行数学建模, 采用加权列车总延误和取消列车的方法, 部分模型可采用商业优化软件 CPLEX 对模型进行求解, 建立的模型可以在一次优化运行中解决大多数实例. 对于比较复杂的实例, 文献 [7] 还提出了两阶段优化方法来提高计算效率. 另外, 根据实际场景分析, 铁路线路故障时间并不一定是已知的, 文献 [11] 在此基础上研究了一种滚动时域的方法用以解决故障时间未知的情况, 并用一个京沪高铁实例对提出的方法进行了验证. 文献 [12] 结合了准移动闭塞原理, 研究了准移动闭塞条件下的高速列车运行调整问题. 但是, 准移动闭塞中后续列车的最大目标制动点仍受制于闭塞分区, 它必须在先行列车占用分区的外方. 因此, 准移动闭塞方式并没有完全突破轨道电路的限制, 在此条件下, 移动闭塞引起了研究人员的兴趣, 文献 [13] 设计了一种移动闭塞系统下高速列车的分布式协同控制机制, 本文也将结合移动闭塞原理来研究安全的车头时距. 随着我国高速铁路运营规模的不断扩大, 高速铁路的运行控制与调度一体化成为智能交通中的若干个科学和技术问题之一^[14], 成为了中国高速铁路智能化发展的必然趋势和迫切需求. 文献 [15] 利用混合整数非线性规划 (mixed integer nonlinear programming, MINLP) 和混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 方法, 进一步结合列车运动学模型, 研究了实时列车运行调整与列车控制的集成, 并提出了 3 种递进的优化处理方法, 初步探索了列车控制与调度一体化的研究课题. 文献 [16] 在文献 [15] 的基础上加入列车节能控制, 优化了速度曲线. 在速度控制层面上, 文献 [17] 提出了更为详细的基于列车牵引和巡航动力学特性分析的速度特性模型. 文献 [18] 结合最新的高速铁路发展趋势, 将列车运行控制与调度结合研究, 进一步在高铁运行控制与调度一体化方向上作出探索. 从算法层面来说, 高速铁路的运行控制与调度优化问题常常采用混合整数规划的建模方法, 文献 [19] 综述了一些解决混合整数规划问题的算法和方向, 对分支定界算法和软件求解方法等作出了比较详细的归类分析, 在实际工程应用上, 还可以采用 MATLAB 等工具进行验证, 相关研究参考文献 [20]. 除了混合整数规划的建模方法, 极大代数法也是一种常用的建模方法, 这种方法可以更好地描述一些与列车延误时间相关的约束条件, 但模型的求解相对混合整数规划问题要更为复杂, 相关研究参考文献 [21, 22]. 调度策略也是一个热门研究问题, 除了前述部分文献研究的取消车次和延迟发车等策略, 更改列车的经停车站也是一种很好的调度优化策略, 相关研究参考文献 [23, 24], 但更改列车经停车站会导致部分乘客无法到达目的车站, 此种策略不太适合中国目前一人一座且目的车站固定的客运模式. 在调度优化问题中, 部分学者还考虑到了乘客的需求, 文献 [25] 研究了城市轨道交通旅客需求时变条件下列车

调度与车流量规划的一体化问题. 另外, 就优化目标而言, 除了优化现有的列车时刻表, 加车后的列车时刻表优化也是值得研究的课题, 文献 [26~28] 就考虑加车这一类特殊的突发事件, 并结合列车的加减速过程简单考虑了列车运动学对时间窗的影响, 文献 [28] 还提出了一种集成原有列车和增开列车的双目标的优化模型和三步优化求解算法.

综上所述, 当前已有的调度模型一般考虑取消车次或者延迟发车等调度策略, 然而在实际中, 例如遇到大风大雪等恶劣天气时, 各路局通常会采取列车降速等调度策略去最大程度地保证列车的运行, 此时的降速运行行为《高速铁路行车组织细则》的硬性规定. 例如 2019 年元旦长沙地区下大雪, 长沙站附近区域运行的列车在风雪来临后综合采取降速运行、延迟发车和取消车次等措施. 从实际的角度出发, 一般情况下降速运行比延迟发车和取消车次能大大减少旅客因晚点产生的焦虑感. 在此背景下, 本文针对实际需要和当前的研究现状, 通过使用事件活动网络, 从调度建模的角度把降速运行 (在数值上作较为宏观的模拟, 即考虑列车因降速运行带来的时间上的变化, 针对列车速度控制较为详细的研究参考文献 [17]) 作为一种固定时间内区间中断的列车运行调整策略, 然后综合考虑取消车次、延迟发车和降速运行 3 种调度策略, 以三者造成的加权延误影响时间最小化为目标, 提出了一种满足行车安全和车站通行能力约束的优化模型. 另外, 本文基于列车运动学模型计算列车降速带来的延误, 将列车运行控制和列车运行调整 (列车延误、降速、取消) 结合起来, 更好地还原了高铁运行过程, 也在一定程度上实现高铁运行控制和调度的一体化目标, 这将有效提高铁路运营效率 (目前, 高速铁路运行控制系统和调度系统为独立运行并且分层的系统架构, 且两层的交互通过人为操作, 在此条件下, 将人为因素影响降至最低并研究高速列车运行控制与动态调度一体化建模方法是我们提升高铁应急决策能力的有效途径). 再者, 虽然当今高速列车一直采取固定闭塞的方式保证行车安全, 但根据未来发展的需要, 移动闭塞方式将会替代固定闭塞方式来保证列车行驶安全. 本文基于移动闭塞的原理和列车运动学模型来计算防碰撞时间, 并将此防碰撞时间作为移动闭塞方式下的列车运行最小安全间隔. 本文最终构建的混合整数规划模型将通过商业优化软件 CPLEX 进行求解, 并以京沪高铁线为例进行仿真验证, 最后使用调度员调度的实际案例与模型计算的结果进行对比, 从而证明了模型结果的有效性和可行性.

2 问题描述

因地质灾害或者设备故障导致前方某区段在一段固定时间内无法通行, 长时间的区间中断将会造成列车大面积晚点或停运. 在此背景下, 本文结合中国高速铁路的实际情况和区间中断的原因, 通过建立混合整数的优化模型对上述问题进行分析 and 优化, 模型的结果可用来辅助调度员的调度指挥工作, 为实时调度决策提供依据.

2.1 公式化

受文献 [6~9] 的启发, 本文将采用事件活动网络对事件进行公式化描述. 从宏观的角度出发, 将高速铁路网 N 抽象为事件和活动构成的网络模型 $N = (E, A)$, 其中 E 表示事件的集合, 事件包括列车的到站和出站, 则事件集合可进一步分为到达事件集合 E^{arr} 和离开事件集合 E^{dep} . 假设列车集合为 T , 车站集合为 S , 不包含首末车站的中间车站集合为 $\bar{S}$, 则事件 $e \in E$ 表示该事件所涉及的列车主体 $t_e \in T$ 离开或到达某个车站 $s \in S$, 而列车 t_e 离开和到达 s 站的事件集合分别用 E_s^{dep} 和 E_s^{arr} 表示. 此外, 为了区分列车初始运行计划和调整后的实际运行计划, 模型设定在事件 $e \in E_s^{\text{dep}}$ 时, 用 x_e 和 x_e^{plan} 分别表示列车离开事件发生的实际时刻和计划时刻; 而当事件 $e \in E_s^{\text{arr}}$ 时, 用 y_e 和 y_e^{plan} 分

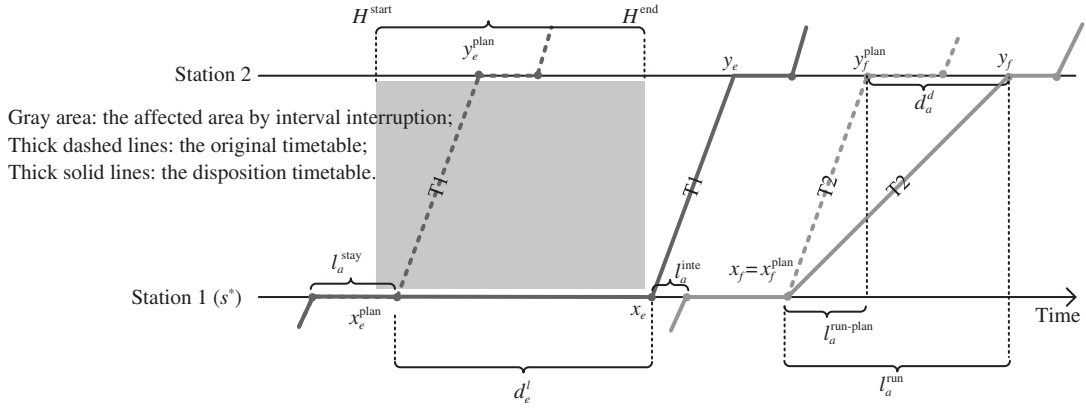


图 1 列车 T1 和 T2 运行示意图

Figure 1 The operation diagram of trains T1 and T2

别表示列车到达事件发生的实际时刻和计划时刻. 此外, 每个车站可同时承载的列车数量 c 是有限制的, 所有车站的最大容纳列车数量集合为 C .

在模型中, A 用来表示活动集合, 一个活动 $a \in A$ 连接两个事件, 进一步 A 可分为列车活动集合和间隔活动集合. 列车活动 $a = (e, e')$ 连接列车 t_e 的不同事件 e 和 e' , 其中 $t_e = t_{e'}$, 间隔活动 $a = (e, f)$ 连接列车 t_e 和 t_f 的事件 e 和 f , 其中 $t_e \neq t_f$. 列车活动和间隔活动分别描述如下.

(1) 列车活动. 列车活动包括同一列车在区间上的运行活动集合 A_{run} 和同一列车在车站内的停站活动集合 A_{stay} .

(2) 间隔活动. 间隔活动包括同一区间上相邻列车的运行间隔集合 $A_{\text{head}}^{\text{track}}$ 和同一站内相邻列车的到发间隔集合 $A_{\text{head}}^{\text{station}}$.

具体地, 我们用不同上标表示不同活动持续的时间, 分类如下:

(1) 最小停留时间. l_a^{stay} 表示停站活动 a 对应列车在车站的最小停留时间, 其中 $a \in A_{\text{stay}}$.

(2) 运行时间. l_a^{run} 表示运行活动 a 对应列车在区间的实际运行时间; $l_a^{\text{run-plan}}$ 表示运行活动 a 对应列车在区间的计划运行时间, 其中 $a \in A_{\text{run}}$.

(3) 最小安全间隔时间. l_a^{inte} 表示间隔活动 a 对应的两列列车追踪运行的最小安全间隔时间, 其中 $a \in A_{\text{head}}^{\text{track}} \cup A_{\text{head}}^{\text{station}}$.

2.2 事件分析

下面以图 1 为例对问题进行简单分析. 图 1 给出了两辆车 (T1 和 T2) 在两个车站 (车站 1 和车站 2) 的运行状况. 如图 1 所示, 事件 e 涉及的列车为 T1, 事件 f 涉及的列车为 T2, 即 $t_e = \text{T1}$, $t_f = \text{T2}$. 当 $e \in E_1^{\text{dep}}$ 时, x_e 与 x_e^{plan} 分别表示列车 T1 在车站 1 的实际发车时刻和计划发车时刻. 类似的, 可以分别定义 y_e 与 y_e^{plan} , x_f 与 x_f^{plan} , y_f 与 y_f^{plan} . l_a^{stay} 表示列车 T1 在车站 1 的最小停留时间; l_a^{inte} 表示列车 T1 与 T2 的最小安全间隔时间; l_a^{run} 表示列车 T2 在区间的实际运行时间; $l_a^{\text{run-plan}}$ 表示列车 T2 在区间的计划运行时间. 在实际中, 一个区间内上下行列车具有一定独立性, 故这里只对一个行车方向进行讨论. 本文考虑的区间中断突发事件定义如下: 已知车站 1 (记为 s^*) 到车站 2 的区间完全中断, 且中断持续时间从 H^{start} 到 H^{end} , 此时车站 1 到车站 2 的区间被称为故障区间, 通过故障区间的列车均受到影响. 此时, 所有通过此区间的列车均需要重新制定运行计划. 跟已有文献不同, 此处我们考虑 3 种调度策略, 即取消车次、延迟发车和降速运行, 通过优化调度算法, 实现调度效率最优的

目标. 取消车次是指列车在本周期的运行计划取消; 延迟发车是指计划中的列车在某站点比原计划延迟一定时间发出 (延迟的时间也需要由调度员决定), 以图 1 为例, 若调度后的 T1 采取了延迟发车策略, 那么 d_e^l 表示延迟发车的时间; 降速运行是指列车原区间计划运行速度降到一个指定等级速度 (降速值由降速因子 θ 决定), 以图 1 为例, 若调度后的 T2 采取的是降速运行策略, 那么 d_a^d 表示列车因降速运行到达目的车站的延误时间.

在上述案例中, 为了尽快恢复行车秩序, 调度员需要统筹决策哪些车需要延迟, 延迟多久, 哪些车需要降速通过某区间. 若区间中断时间过长, 调度员还需要根据区间中断的全局影响来决策某列车是否需要取消. 这些决策给调度员造成了繁重的任务, 且具有一定的主观性, 调度员的经验不足常常会导致调度效率低下. 针对此问题, 本文综合考虑了实际操作中常见的调度策略, 分别量化取消车次、延迟发车和降速运行 3 种调度策略造成的延误影响, 以三者加权延误影响最小化为优化目标建立模型. 模型在决策过程中综合考虑各种约束条件, 其实时性、稳定性都要高于人的决策能力, 且调度效率更高, 有助于将突发事件对高速列车运行的影响降低到最小.

2.3 假设条件

结合高铁调度的实际情况, 本文根据研究的需要和方便作出了一些假设条件.

(1) 假设区间中断的起始时刻、结束时刻和发生区间是固定已知的, 且区间中断的时长总是小于高铁运行周期.

(2) 假设区间中断开始时已经进入故障区间的列车通过了故障区间, 这些列车不在模型的调度范围之内.

(3) 虽然当今高铁运行线存在单线、双线和多线各种模式, 但大部分为双线模式. 双线模式下每个铁路区间都会组织列车双向行驶, 因此本文只考虑主流的双线情况, 且正常情况下, 上下行列车独立运行不会相互干扰.

(4) 始发和终到车站不考虑容量限制.

3 模型建立

3.1 目标函数

从第 1 节的分析可知, 高速列车在区间中断下的调度问题可描述为一种组合优化问题. 为了最大程度减小区间中断带来的影响, 本文考虑了取消车次、延迟发车和降速运行 3 种调度策略, 并分别对每一种调度策略的延误时间影响进行量化, 取三者的加权延误时间和为目标函数. 建立的目标函数为

$$\min \sum_{t \in T} \gamma_1 b_{1,t} + \sum_{e \in E, t \in T} \gamma_2 b_{2,t} d_e^l + \sum_{a \in A, t \in T} \gamma_3 b_{3,t} d_a^d, \quad (1)$$

$$b_{1,t} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } t \in T \text{ 取消,} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad b_{2,t} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } t \in T \text{ 延迟,} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad b_{3,t} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } t \in T \text{ 降速,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

在上述模型当中, 分别给予 3 种调度策略不同的惩罚因子 γ_1 , γ_2 和 γ_3 , 用来表示 3 种调度策略的影响力. 惩罚因子取值越大表明调度策略影响越严重, 造成的延误影响越大. 根据实际调度的需要, 不同的列车需要采取不同的调度策略, 式 (2) 为 3 个 0-1 变量, 其中 $b_{1,t}$ 用来表示列车 t 是否取消, $b_{2,t}$ 表示列车 t 是否延迟发车, $b_{3,t}$ 表示列车 t 是否降速运行. 目标函数包含 3 部分, 第 1 部分表示被取消的

列车带来的延误影响; 第 2 部分用来衡量列车延迟发车的晚点时间, 其中 d_e^l 表示列车的晚点时间; 第 3 部分表示采取降速运行的列车带来的延误影响, d_a^d 表示降速带来的晚点时间, 这部分晚点是列车在区间内的降速运行导致的. 3 种调度策略在惩罚因子的控制下, 以总加权延误影响最小化为优化目标, 通过求解此目标函数便可得到最优调度方案.

区间中断时, 调度决策需要给每列列车重新制定开行方案. 在此情况下, 本模型考虑为每列受区间中断影响的列车分配一种调度策略, 当列车受中断事件影响时, 每列车可采取的调度策略都是唯一的. 此约束的描述如下:

$$\text{if } x_e^{\text{plan}} \geq H^{\text{start}}, \text{ then } b_{1,t} + b_{2,t} + b_{3,t} = 1, \forall e \in E_s^{\text{dep}}, \forall t \in T. \quad (3)$$

本模型用 x_e 表示事件 e 调整后的实际发车时刻, 用 x_e^{plan} 表示事件 e 的计划发车时刻, H^{start} 和 H^{end} 表示区间中断的开始和结束时刻, 它们在本文的模型中是已知的. 式 (3) 表示当某列列车受区间中断影响后, 该列车只能采取取消车次、延迟发车和降速运行 3 种调度策略当中的一种.

在模型中, s^* 表示受区间中断影响的第一个车站 (见图 1), 在空间位置上, 它通常是突发事件发生的车站或者中断区间的上一个车站 (沿着当前列车运行方向). 由于区间中断的影响, 此站列车在故障结束之前无法进行发车操作, 故无法采取降速的调度策略. 因此, 区间中断时即从 s^* 站发车的列车必须延迟发车或者取消 (其他车站的列车不受此限制, 可采取任意 3 种策略之一), 其发车时刻将至少延后到 H^{end} 之后. 此约束描述如下:

$$\text{if } H^{\text{start}} \leq x_e^{\text{plan}} \leq H^{\text{end}}, \text{ then } x_e \geq H^{\text{end}}, \forall e \in E_{s^*}^{\text{dep}}, \quad (4)$$

这里的 $E_{s^*}^{\text{dep}}$ 特指从 s^* 站发车的列车离开事件集合.

高速列车在不受突发事件影响时都会按照计划运行, 下面将对列车正常运行状态的相关约束进行描述:

$$x_e = x_e^{\text{plan}}, \forall e \in E_s^{\text{dep}}, x_e^{\text{plan}} \leq H^{\text{start}}, \quad (5)$$

$$y_e = y_e^{\text{plan}}, \forall e \in E_s^{\text{arr}}, y_e^{\text{plan}} \leq H^{\text{start}}, \quad (6)$$

$$\text{if } x_e^{\text{plan}} < H^{\text{start}}, \text{ then } b_{1,t} = b_{2,t} = b_{3,t} = 0, \forall t \in T, \quad (7)$$

其中, y_e 表示事件 e 调整后的实际到站时刻, y_e^{plan} 表示事件 e 的计划到站时刻. 式 (5) 和 (6) 表示区间中断之前列车按照原计划运行图运行. 同理, 式 (7) 意味着区间中断之前不会有取消车次、延迟发车、降速运行的情况发生.

接下来的式 (8)~(15) 为目标函数中的相关变量的约束条件, 模型中通过计算得到取消车次、延迟发车和降速运行带来的延误影响. 这里对表示取消车次的相关变量的约束进行描述:

$$M_1 b_{1,t} \leq x_e - x_e^{\text{plan}} \leq M_1, \forall e \in E, \forall t \in T, \quad (8)$$

其中, 参数 M_1 为高铁运行周期 (包括运行时间早 06:00 至晚 12:00 和天窗时间晚 12:00 至早 6:00), 其值为 1440 min. 根据不等式 (8), 当 $b_{1,t} = 0$ 时, 表示列车 t 不取消, 此时列车的实际发车时刻不能早于原计划时刻, 且延迟发车的时间不能大于 M_1 ; 当 $b_{1,t} = 1$ 时, 即列车 t 取消, 列车被取消意味着此列车不再参与本周期的列车运行计划, 此时取消的列车在一个周期后恢复运行, 即 $x_e^{\text{plan}} + M_1$.

进一步地, 延迟发车的相关变量需满足以下约束:

$$d_e^l \geq b_{2,t}(x_e - x_e^{\text{plan}}), \forall e \in E, \forall t \in T, \quad (9)$$

$$D \geq d_e^l \geq 0, \forall e \in E, \quad (10)$$

式 (9) 表示事件 e 对应的列车 t 的晚点时间. 考虑到乘客满意度问题, 避免某列列车晚点时间过长, 式 (10) 用参数 D 限制了最大可晚点时间, D 的取值可以根据实际需要灵活调整.

约束条件 (8)~(10) 已经对取消或延迟发车的列车进行约束, 下文将对某区间中断下降速运行的列车的相关约束进行描述. 这里结合列车运动学模型对列车的速度进行控制, 某区间中断后列车能根据运行调整方案按照期望的速度运行. 列车降速一般会导致列车到站晚点, 所以模型需要将此部分的晚点时间计算出来并综合考虑列车在某区间中断后该采取何种调整运行方案. 需考虑的相关约束包括:

$$\tilde{v}_a = (1 - b_{3,t})\tilde{v}_a^{\text{plan}} + \theta b_{3,t}\tilde{v}_a^{\text{plan}}, \quad (11)$$

$$l_a^{\text{run-plan}} = y_{e'}^{\text{plan}} - x_e^{\text{plan}}, \quad (12)$$

$$l_a^{\text{run}} = 2\tilde{v}_a/\tilde{a} + [\tilde{m} - (\tilde{v}_a)^2/\tilde{a}]/\tilde{v}_a, \quad (13)$$

$$y_{e'} = x_e + l_a^{\text{run}}, \quad (14)$$

$$d_a^l = l_a^{\text{run}} - l_a^{\text{run-plan}}, \quad (15)$$

其中 $\forall e \in E_{s-1}^{\text{dep}}, \forall e' \in E_s^{\text{arr}}, \forall a \in A_{\text{run}}, \forall s \in S, \forall t \in T$. $\tilde{v}_a^{\text{plan}}$ 表示列车计划运行速度; $\tilde{v}_a$ 是列车在区间的实际稳定运行速度. 某区间中断后需要采取降速运行策略的列车需要保持较小的速度在线路上运行, 式 (11) 采用降速因子 θ 来完成列车的降速处理, 这里 θ 取 (0, 1) 范围内的任意常数. 由于列车的计划运行图是已知的, 相关数据可从高铁官方网站上获取. 这里模型中的 $l_a^{\text{run-plan}}$ (见图 1) 表示列车在区间的计划运行时间, 可通过式 (12) 计算得出. 式 (13) 可以计算出列车在按照调整策略降速后在区间内的运行时间, 即 l_a^{run} , 其中 $\tilde{m}$ 表示高速铁路行车区间的里程, $\tilde{a}$ 表示列车加速或者减速的加速度, 高速列车的加减速过程可简化为同样的匀加 (减) 速运动. 在此条件下, 模型根据式 (14) 也可以得到列车在下一个区间的实际到达时刻. 模型计算出列车降速前后的区间运行时间之后, 根据式 (15) 可以进一步得出列车因降速运行产生的晚点时间.

注释1 式 (13) 中的 l_a^{run} 可通过简化后的列车运动模型计算得到. 我们将高速列车在行车区间的运行过程简化为一个匀加速、匀速以及匀减速 3 段式的过程. 假设列车制动和提速的加速度相同, 计算 $\tilde{v}_a/\tilde{a}$ 可分别得到列车在匀加速段和匀减速段的运行时间, 计算 $[\tilde{m} - (\tilde{v}_a)^2/\tilde{a}]/\tilde{v}_a$ 可得到中间匀速运动过程的列车运行时间, 3 段时间之和即为列车降速后在区间的实际运行时间 l_a^{run} .

3.2 约束条件

除了目标函数中变量需满足一定约束外, 列车在实际运行中还要满足一些车站和线路相关的约束. 高速铁路安全是影响高速列车行车的最关键约束之一, 再加上车站容量的限制, 本文考虑了单列列车运行约束、列车间隔约束、越行约束、车站能力约束和列车停站约束 5 类约束条件. 这些约束条件保证了模型的合理性和有效性.

(1) 单列列车运行约束. 区间中断发生后, 列车的运行会受到影响, 但每列列车经过所有车站的顺序不会发生改变 (即不会改变行车线路), 且所有相邻列车在车站的发车顺序也不会发生变化 (即不会发生越行). 由上述条件可知, 每两个事件 e 和 e' 组成的活动 a 都需要满足在区间内的最小运行时间和在车站内的最小停站时间 (供旅客上下车或者列车设备检修和维护) 限制, 约束条件如下:

$$y_{e'} - x_e \geq l_a^{\text{run}}, \forall a = (e, e') \in A_{\text{run}}, t_e = t_{e'}, \forall e \in E_s^{\text{dep}}, \forall e' \in E_{s+1}^{\text{arr}}, \quad (16)$$

$$x_{e'} - y_e \geq l_a^{\text{stay}}, \forall a = (e, e') \in A_{\text{stay}}, t_e = t_{e'}, \forall e \in E_s^{\text{arr}}, \forall e' \in E_s^{\text{dep}}. \quad (17)$$

在式 (16) 中, $a \in A_{\text{run}}$ 表示区间内的运行活动, l_a^{un} 表示列车在区间内的最小运行时间, 此约束保证了列车在区间的运行速度受到限制. 在式 (17) 中, $a \in A_{\text{stay}}$ 表示车站内的停站活动, l_a^{stay} 表示车站内的最小停站时间, 此约束则能保证列车具有充足的办客时间.

(2) 列车间隔约束. 为了保证列车的行车安全, 在运行过程中避免列车碰撞, 相邻列车之间必须保证足够的行车距离, 这里的行车距离包括列车在区间内的运行间隔和在车站内的到发间隔. 此外, 高速铁路上进入区间运行的两列列车必须存在先后顺序. 相关约束如下:

$$x_f - x_e + M_2(1 - b_a^{\text{order}}) \geq l_a^{\text{inte}}, \quad (18)$$

$$b_a^{\text{order}} + b_{-a}^{\text{order}} = 1, \quad \forall a = (e, f) \in A_{\text{head}}^{\text{track}}, \quad (19)$$

$$b_a^{\text{order}} = \begin{cases} 1, & \text{列车活动 } a = (e, f), e \text{ 发生在 } f \text{ 之前,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (20)$$

其中 $-a = (f, e) \in A_{\text{head}}^{\text{track}}$, $t_e \neq t_f$. 这里的 l_a^{inte} 表示两列列车之间的最小安全间隔; M_2 是一个足够大的常数; b_a^{order} 是衡量列车先后顺序的 0-1 变量. 式 (18) 表示在区间运行的相邻列车必须保持安全距离. 式 (19) 说明了任意的区间列车运行活动只存在一种行车顺序.

实际上, 当今高速列车的运行一直采取固定闭塞的机制来防止列车碰撞, 固定闭塞的原理是让每列列车在运行中独占一个闭塞区间从而避免列车碰撞. 固定闭塞机制安全可靠, 但在线路资源紧张、行车密度较大的情况下, 固定闭塞机制因独占一个闭塞区间而加剧线路紧张, 且该机制的实现需要依赖硬件物理划分好一个个分区. 因此, 根据中国高速铁路未来的发展目标, 移动闭塞方式将会替代固定闭塞方式来保证列车行驶安全. 移动闭塞的安全机制是两列相邻列车之间保持一个最小动态安全距离, 采用移动闭塞方式运行的列车需要获取自身与先行列车之间的距离和列车进路条件, 然后计算并设定列车运行速度. 采用这种闭塞方式的列车之间的距离并不固定, 只需保证后续列车和前方列车之间具有制动距离加适当的防护距离. 移动闭塞方式会使行车密度大大提高, 从而提高高速铁路列车运行的效率. 当列车遭遇某区间中断时, 受影响的列车在受影响的区段行车密度很高, 为了进一步提高线路利用率, 本模型基于移动闭塞的原理来保证列车之间的最小车头时距, 目的是在将此方法与本文的调度策略相结合的情况下对此方法的优势作出探讨与分析.

$$l_a^{\text{inte}} = [(1 - b_a^{\text{order}})(1 - b_a^{\text{vel}}) + b_a^{\text{order}}b_a^{\text{vel}}] \cdot |l_{a_1}^{\text{run}} - l_{a_2}^{\text{run}}| + [b_a^{\text{order}}\tilde{v}_{a_2} + (1 - b_a^{\text{order}})\tilde{v}_{a_1}]/\tilde{a}, \quad \forall a \in A_{\text{head}}^{\text{track}}, \quad \forall a_1, a_2 \in A_{\text{run}}, \quad (21)$$

$$b_a^{\text{vel}} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } t_e \text{ 的运行速度不快于列车 } t_f, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (22)$$

其中 $a = (e, f)$ 属于同一区间上相邻列车的运行间隔活动; $a_1 = (e, e')$ 和 $a_2 = (f, f')$ 分别属于同一列车在区间上的运行活动, 且 $t_e = t_{e'}$, $t_e \neq t_f$, $t_f = t_{f'}$. 这里 l_a^{inte} 表示移动闭塞运行方式下列车所需要的最小安全间隔; b_a^{vel} 是衡量列车相对速度的 0-1 变量. 式 (21) 给出了 l_a^{inte} 的计算公式, 其中第一项表示前车比后车速度慢时两车到达下一站的时间差 (当前车较快时, 此项为 0), 后一项表示后车减速至完全停车所需要的时间, 我们以这两项之和作为两列车的最小安全间隔, 便可以完全避免两列车之间的碰撞. 此方法不但可以充分保证列车相互之间的行车安全, 也可以保证线路资源的充分利用.

(3) 越行约束. 本文所研究的线路是现今高铁运行的双线单向铁路, 在此背景下, 相同方向的列车不可能在区间内发生越行, 否则调度策略将难以保证列车在区间内的行车安全, 列车将存在碰撞风险.

相应约束条件描述如下:

$$b_a^{\text{order}} - b_{a'}^{\text{order}} = 0, \forall a = (e, f), a' = (e', f') \in A_{\text{head}}^{\text{track}}, \forall e, f \in E_s^{\text{dep}}, \forall e', f' \in E_{s+1}^{\text{arr}}, \quad (23)$$

其中 $t_e = t_{e'}$, $t_e \neq t_f$, $t_f = t_{f'}$. 这里 $(s, s+1)$ 表示相邻两个车站之间的区间, 若同向运行的列车 t_e 在列车 t_f 之前从车站 s 发车, 那么列车 t_e 也会在列车 t_f 之前到达车站 $s+1$. 此约束说明任意两列列车在上一站的发车顺序和下一站的到达顺序相同, 用于保证列车在区间运行时不会发生越行.

(4) 车站能力约束. 为了确保调整后的运行计划在实践中是可行的, 模型考虑同一时间车站的列车通行或者停靠能力. 到达或通过车站的列车被分配到车站股道上, 由于列车股道具有独占性, 一个车站股道同一时间只可以停靠一列列车, 同一时间车站内的列车数量不能超过车站到发线的数量. 车站容量的约束条件如下:

$$\sum_{a=(e,f) \in A_{s,f}^1} b_a^{\text{order}} - \sum_{a=(e,f) \in A_{s,f}^2} b_a^{\text{seq}} + 1 \leq c_s, \forall s \in \bar{S}, \quad (24)$$

$$y_f - x_e + M_2(1 - b_a^{\text{seq}}) \geq l_a^{\text{inte}}, \forall a \in A_{\text{head}}^{\text{station}}, \forall e, f \in E_s^{\text{arr}}, \quad (25)$$

$$b_a^{\text{seq}} = \begin{cases} 1, & \text{列车 } t_e \text{ 离开车站 } s \text{ 在 } t_f \text{ 到达此站之前,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (26)$$

其中 $a = (e, f)$, $t_e \neq t_f$, s 为排除首末车站的中间车站, c_s 表示第 s 个车站的车站容量; $A_{s,f}^1 \subset A_{\text{head}}^{\text{track}}$ 表示列车 t_f 到达车站 s 前与其他任意到达列车 t_e 之间的间隔活动集合; $A_{s,f}^2 \subset A_{\text{head}}^{\text{station}}$ 表示列车 t_f 到达车站 s 前与其他任意待发列车 t_e 之间的间隔活动集合. 在每列下行或者上行方向的列车到站之前, 模型统计停在该车站下行或者上行方向的列车总数, 然后用该车站下行或者上行方向的股道数量减去停在车站的列车数量就得到了车站下行或者上行方向的剩余列车通行能力. 式 (24) 表示任意一列列车在到站之前都至少有一条空股道供此列车占用, 其中 $\sum_{a=(e,f) \in A_{s,f}^1} b_a^{\text{order}} - \sum_{a=(e,f) \in A_{s,f}^2} b_a^{\text{seq}}$ 表示在每列车到达中间站之前同方向停留在该车站的列车数量, $+1$ 表示提供给即将进站列车的一个股道, 这个和数不能超过车站当前运行方向的股道数量. 注意, 列车在任何时刻都要注意保持与前后列车的最小安全间隔, 式 (25) 表示在站内将占用同一股道的列车也需保持安全间隔. 同理, 模型中的 b_a^{seq} 是列车先后顺序的 0-1 变量, 由式 (26) 给出定义.

(5) 列车停站约束. 在车站里, 需要办客的列车需要被分配到一条股道上停站. 两列列车不能同时同一条股道上运行或停站, 只有当一列列车离开车站股道后, 另一列列车才能到达该股道. 车站可停靠列车数和到发线的数量是相同的, 如果某列列车和另一列列车在车站同一股道停站, 则应满足较早列车发车和较晚列车到站之间的最小车头时距, 相关约束如下:

$$x_e - y_f \geq l_a^{\text{stay}} b_{\bar{a},s}^{\text{stay}} + l_a^{\text{inte}}, \quad (27)$$

$$\forall a = (e, f) \in A_{\text{head}}^{\text{station}}, \forall \bar{a} = (e', f') \in A_{\text{stay}}, \forall e, f \in E_s^{\text{arr}}, \forall e' \in E_s^{\text{dep}},$$

$$b_{\bar{a},s}^{\text{stay}} = \begin{cases} 1, & \text{活动 } \bar{a} \text{ 对应的列车在车站 } s \text{ 停站,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (28)$$

其中 $t_e = t_{e'}$, $t_e \neq t_f$. 这里 l_a^{stay} 为最小停站时间, 是否停站由 0-1 矩阵 $b_{\bar{a},s}^{\text{stay}}$ 决定, 这里的 $b_{\bar{a},s}^{\text{stay}}$ 可以由计划运行图提前确定. 每列列车投入使用之前已经根据客运需要计划好经停的车站, 原则上运行调整不能改变列车计划经停车站, 此式用来描述这一情形.

4 模型求解

前文建立的模型属于 MINLP 模型, 在计算复杂度上属于 NP 难问题. 大量研究学者致力于提出这类问题的近似求解算法, 但当问题规模过大时, 仍然很难在较短时间内求得近似最优解. 随着基础数学和计算机技术的快速发展, 现有研究也开发了一些确定型算法和启发式算法用于求解混合整数线性规划和混合整数非线性规划问题, 并在此基础上开发了一些求解软件来得到相关问题的次优可行解. 在一定数据规模的问题中, 很多软件的内置算法已经可以得到最优解. 本文选择 CPLEX 对模型进行求解, 该软件内置的分支定界和切割相结合的算法能够很好地求解本文所创建的 MINLP 模型. 根据实际测试情况, 第 5 节的案例一般能在足够短的时间内计算出来, 方案的实时性很好.

5 案例分析

本节将模型运用到京沪高铁客运线进行验证, 对验证场景进行了精心设计, 并对求解结果进行了合理的可行性分析. 最后使用上海铁路局真实发生的调度案例与模型求解的结果进行对比, 对比结果显示模型的解决方案能有效地提高调度效率, 减小区间中断对高速列车运行的影响.

5.1 案例描述

为了验证模型的可行性, 本文以京沪高速铁路为原型进行分析. 京沪高铁北起北京南站, 南至上海虹桥站, 沿线经过 21 个车站, 这 23 个车站将京沪铁路线划分成 22 个区间. 京沪高铁线日列车开行量在 100 列以上, 本案例将考虑 100 列列车的运行与调度, 列车开行速度主要为 300 km/h, 故本文的模型验证暂且只考虑速度等级为 300 km/h 的列车.

仿真实例的参数设置需要按照以下的规则. 根据客运的实际情况分析, 列车取消对铁路的服务会产生巨大的影响, 是最难被接受的调度策略, 因此列车取消对应的惩罚因子设置为最大, 而列车降速运行又比延迟发车更能让乘客接受, 所以降速运行是在铁路发生区间中断后较能被乘客接受的调度策略, 因此, 模型在实例中赋予列车降速的惩罚因子最小. 综合考虑下, 本文赋予取消车次、延迟发车、降速运行的经验参数分别为 1000, 20, 5. 注意, 这些经验参数并不一定是最合适的, 若将模型应用于实际系统, 还需要根据实际情况对参数作出调整, 本文不对这些参数展开研究. 根据假设 4, 在仿真实验时, 北京南和上海虹桥站作为始发和终到车站, 故模型不考虑股道数量限制. 列车停站时间和区间运行时间参考实际京沪高铁区间运行时间的数值, 不同列车具有不同的计划运行时间、停站方式、停站时间等. 更多相应的车站信息、股道信息以及区间长度信息参见表 1. 参数 M_1 取值 1440, M_2 取值 1500.

5.2 区间中断场景设计

结合京沪高铁运行的实际情况, 为了更好地验证模型的可行性, 本文通过设计区间中断的时长与地点来形成不同的场景. 在运行前期、运行中期、运行后期 3 个时间点分别验证, 每一种场景又假设了影响程度不同的区间中断. 具体的假设场景如表 2 所示, 本文考虑了 5 个时长的中断持续时间. 根据铁路局数据库的历史数据统计情况, 影响时长在 0.5 ~ 5 h 的事件突发频率较高, 故本文重点测试了中断时长在 5 h 以内的场景. 场景假设在泰安至曲阜东, 宿州东至蚌埠南, 南京南至镇江南 3 处区间.

5.3 仿真分析

表 2 给出了仿真计算结果, 模型分别给出了每种场景下的取消车次、延迟发车、降速运行数量以及模型求解所需要的时间. 为了测试降速因子对整体调度方案的影响, 表 2 分别给出了降速因子为 0.6

表 1 京沪高铁基本运行情况

Table 1 Basic operating data of Beijing-Shanghai high-speed railway

Station	Number of tracks	Segment	Mileage (km)	Running time (min)
Beijing South	—	—	0	0
Langfang	4	Beijing South-Langfang	59	12
Tianjin South	4	Langfang-Tianjin South	72	15
Cangzhou West	6	Tianjin South-Cangzhou West	88	16
Dezhou East	7	Cangzhou West-Dezhou East	108	19
Jinan West	12	Dezhou East-Jinan West	92	17
Taian	6	Jinan West-Taian	43	11
Qufu East	6	Taian-Qufu East	71	13
Tengzhou East	4	Qufu East-Tengzhou East	56	10
Zaozhuang	6	Tengzhou East-Zaozhuang	36	6
Xuzhou East	10	Zaozhuang-Xuzhou East	63	11
Suzhou East	6	Xuzhou East-Suzhou East	79	12
Bengbu South	8	Suzhou East-Bengbu South	77	15
Dingyuan	4	Bengbu South-Dingyuan	53	9
Chuzhou	6	Dingyuan-Chuzhou	62	12
Nanjing South	6	Chuzhou-Nanjing South	59	10
Zhenjiang South	6	Nanjing South-Zhenjiang South	69	12
Danyang North	4	Zhenjiang South-Danyang North	25	4
Changzhou North	6	Danyang North-Changzhou North	32	5
Wuxi East	6	Changzhou North-Wuxi East	57	10
Suzhou North	6	Wuxi East-Suzhou North	26	4
Kunshan South	12	Suzhou North-Kunshan South	32	5
Shanghai Hongqiao	—	Kunshan South-Shanghai Hongqiao	43	10

(降速至 180 km/h) 和 0.4 (降速至 120 km/h) 时模型的调度方案, 表中每种策略下的第 1 列表示降速因子为 0.6 时的调度方案, 第 2 列表示降速因子为 0.4 时的调度方案.

根据表中数据可得出以下结论.

(1) 取消车次在中断时间较短的场景中是很少见的, 中断时间越长取消的车次会越多. 这与实际情况相符, 一般情况下, 列车调度员不愿意直接取消一个车次, 但是长时间的区间中断只能通过取消部分车次来缓解线路运输的压力.

(2) 表中数据直观地体现了突发事件的影响程度, 在 15 个中断场景中, 第 10 个中断场景的影响最为严重. 宿州东至蚌埠南路段属于京沪线较为繁忙的路段, 加上线路中断时间长, 区间距离较长, 处于运行周期中最繁忙时段等因素, 合计有 70 列列车的正常运行计划被打乱.

(3) 线路末端取消车次相对较少, 但几乎所有列车的运行都将受到影响. 仿真测试的方向是北京至上海方向, 南京南至镇江南段接近线路的末端, 由于已经处于运行状态的列车无法被取消, 故区间中断的影响只能通过降速运行和延迟发车的策略来消除, 因此, 南京南至镇江南段几乎所有列车受到影响 (19:00 以后日列车运行计划中大约还有 30 余车次的计划待执行).

(4) 对比所有的调度方案, 降速运行策略的运用最为广泛. 这是惩罚因子的作用, 在选取惩罚因子

表 2 区间中断的场景设计和仿真结果
Table 2 Design and simulation results of segment blockage scenarios

No.	Time	Segment	Blocking time (h)	Number of trains						Computation time (s)	
				Train cancellation		Departure delay		Deceleration			
				0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4
1	10:00	Taian-Qufu East	0.5	0	0	4	4	9	10	5.26	5.43
2	10:00	Taian-Qufu East	1	1	1	6	5	10	12	6.07	6.27
3	10:00	Taian-Qufu East	2	9	8	7	9	8	13	6.24	6.98
4	10:00	Taian-Qufu East	3	17	17	6	5	8	9	6.73	7.06
5	10:00	Taian-Qufu East	5	25	22	17	19	23	30	8.47	7.20
6	14:00	Suzhou East-Bengbu South	0.5	0	0	6	5	12	13	6.22	6.47
7	14:00	Suzhou East-Bengbu South	1	3	3	8	7	14	16	6.78	7.01
8	14:00	Suzhou East-Bengbu South	2	15	14	14	17	12	7	7.45	7.86
9	14:00	Suzhou East-Bengbu South	3	21	20	17	25	17	25	7.99	8.23
10	14:00	Suzhou East-Bengbu South	5	25	23	14	19	35	41	8.11	8.32
11	19:00	Nanjing South-Zhenjiang South	0.5	0	0	6	5	11	13	4.06	4.18
12	19:00	Nanjing South-Zhenjiang South	1	1	1	8	6	11	13	4.25	4.39
13	19:00	Nanjing South-Zhenjiang South	2	5	5	6	5	11	13	4.70	4.77
14	19:00	Nanjing South-Zhenjiang South	3	6	6	7	7	17	18	5.05	5.17
15	19:00	Nanjing South-Zhenjiang South	5	8	8	21	17	10	11	5.11	5.23

时, 降速运行的惩罚因子最小, 降速运行策略成为最容易被采用的调度策略, 当降速运行策略对延误时间的消除作用越强时, 它被系统分配的可能性越大.

(5) 对比每个场景中两种降速因子的调度方案, 降速因子 θ 取值越小, 降速运行策略应用越多. 这是因为列车运行速度越慢, 列车在下一站的晚点时间越长, 对延误时间的适应性越强, 而系统中降速运行策略受到最小的惩罚因子约束, 故采取降速运行策略的列车会有所增加.

(6) 模型的求解过程都能在几秒钟内很好地完成, 最长的求解时间也不超过 10 s, 保证了调整方案的实时性和有效性, 使模型可以适用于辅助调度员的调度任务.

5.4 与人工调度及固定闭塞机制下的调度对比分析

本小节将调度员在区间中断下的实际调度结果与模型求解的结果进行比较, 比较的结果显示了本文模型的优越性和有效性.

本案例使用的是上海铁路局的调研数据, 案例描述了京沪高铁线某年 21 时 08 分 G368 次 (上海虹桥 – 郑州东) 司机报告列车运行在常州北站至丹阳北站间上行线 1123 km 000 m 处 07 车受电弓自动降弓的影响, 造成该列车在丹阳北站至镇江南站间上行线 1120 km 135 m 处被迫停车, 22 时 13 分恢复常速运行. 区间中断造成后续 11 列列车不同程度的晚点. 本文根据提出的模型对此案例中的 11 列列车给出了另外一套调度方案. 图 2 是依赖调度员经验人工调度的结果. 图 3 是本文建立的模型在不考虑移动闭塞条件时给出的调度方案 (本方案中的列车行车安全距离根据图 2 调度员的调度结果和固定闭塞模式下 4 min 的最小安全间隔二者的最小值来确定). 图 4 是本文建立的模型在综合所有约束条件后给出的最终方案.

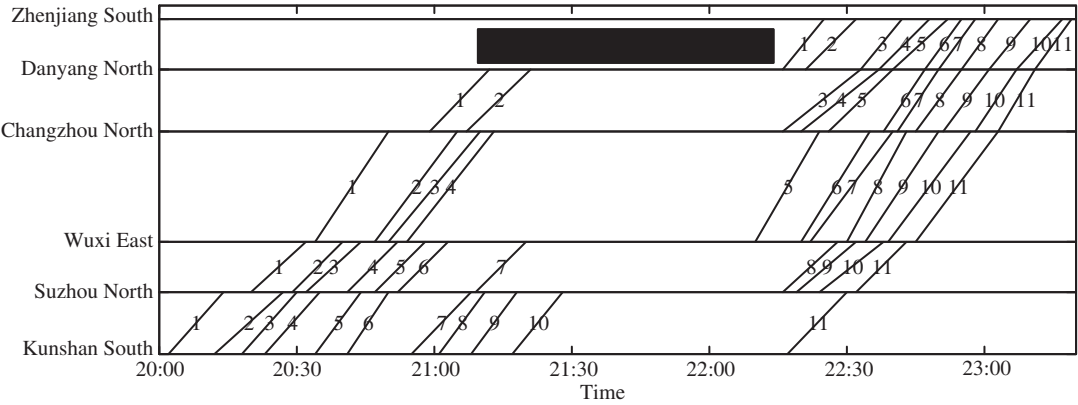


图 2 调度员实际调度运行调整效果
Figure 2 The adjustment results performed by the dispatcher

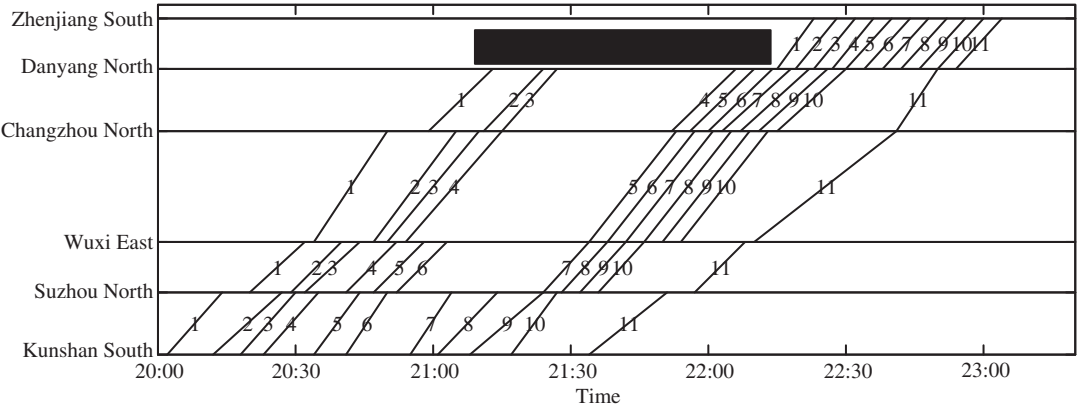


图 3 本文模型在无移动闭塞约束条件下的运行调整效果
Figure 3 The adjustment results performed by the proposed model without moving block constraints

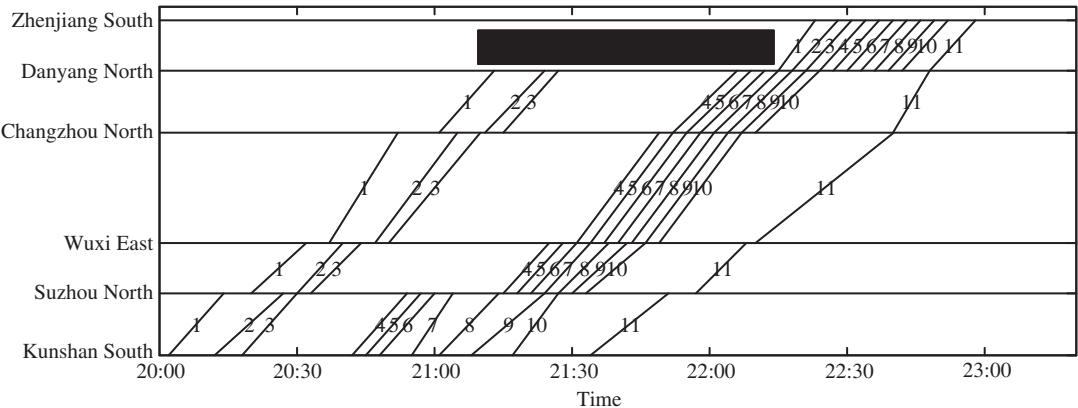


图 4 本文模型运行调整效果
Figure 4 The adjustment results performed by the proposed model

根据图 2 调度员调度结果, 调度员一般采取的调度策略都是在某区间中断后命令列车依次在中断区间或车站的后方车站停车等待. 在本案例中, 丹阳北和镇江南区间列车自动降弓, 根据调度员的命

表 3 3 种调度方案的晚点时间和调度策略对比
Table 3 Comparison of delay time and strategies of three scheduling methods

Serial number	Figure 2		Figure 3		Figure 4	
	Delay time (min)	Strategy	Delay time (min)	Strategy	Delay time (min)	Strategy
G7176	61	Departure delay	62	Departure delay	62	Departure delay
G9406	57	Departure delay	54	Departure delay	54	Departure delay
G7590	63	Departure delay	55	Departure delay	56	Departure delay
G9470	64	Departure delay	51	Departure delay	53	Departure delay
G4326	70	Departure delay	56	Departure delay	59	Departure delay
G7178	74	Departure delay	60	Departure delay	64	Departure delay
G1378	59	Departure delay	47	Departure delay	52	Departure delay
G4306	62	Departure delay	48	Departure delay	53	Departure delay
G7300	58	Departure delay	38	Departure delay	44	Departure delay
G7596	55	Departure delay	30	Departure delay	37	Departure delay
G9414	30	Departure delay	20	Deceleration	26	Deceleration

令, 后方列车依次停靠在丹阳北、常州北、无锡东、苏州北、昆山南 5 个车站, 一个事件造成了一个行车方向 5 个车站的瘫痪, 并且晚点时间较长. 由此可见, 虽然区间中断仅仅持续了一个小时, 但造成的影响是十分巨大的. 结合图 3 分析, 在模型的调度下, 区间中断依然影响了 11 列列车, 但是影响程度却大为减少. 结果显示, 前 10 列列车在相应的车站采取延迟发车的调度策略, 实际造成的晚点时间对比于调度员的结果大为缩短, 最后 1 列列车采取降速运行的调度策略 (降速至 180 km/h), 且第 11 列列车只需要在中断区间前方区间进行一小段时间的降速运行即可. 在区间中断时长可以预知的条件下, 本模型可以提前作出决策 (即给列车分配合理的运行计划, 包括是否采取降速或者取消以及在各车站的发车时刻), 如图 3 所示, 模型能够安排苏州北、无锡东、常州北的列车根据合理的运行要求提前发车, 缩短了列车在车站的等待时间, 也缩短了此时整个调度系统的延误时间.

由于本文的研究对象为速度等级都为 300 km/h 的高速列车, 列车的速度等级相同, 故采取相同策略的列车之间的车头时距也是相等的, 由此, 采取相同策略的列车之间的发车间隔, 到站间隔也是相同的. 这里, 我们通过图 3 和 4 的对比可以看到移动闭塞原理相对于固定闭塞的优势, 图 4 的列车间隔进一步缩小, 行车密度加大, 列车晚点情况更能有效地恢复. 根据图 2 显示的调度员调度情况, 列车之间的开行车头时距相对较大且存在变化, 这里车头时距的变化往往是调度员应急处置效率低下而导致的, 调度员无法在同一时间合理安排各列车的发车进路. 图 3 表明, 本文建立的模型可以解决人工调度的滞后性, 能同时有效地利用 3 种调度策略去调度列车. 图 4 的结果加入了移动闭塞条件, 基于移动闭塞原理计算而来的车头时距相对较小且均匀 (具有同样速度等级的列车在移动闭塞条件下的车头时距也相同), 进一步提高了线路利用率.

表 3 给出了在上述案例中受突发事件影响的 11 列列车在 3 个调度方案中的晚点时间以及对应采取的调度策略, 结果显示, 相对于调度员人工处理而言, 模型调度基本都能够更加有效地控制晚点时间. 每列列车的晚点时间经历了一个先小幅度增大再缓慢减小的变化过程, 此变化规律表明模型的优化调度结果也符合调度员调度的规律. 虽然第 1 列列车在模型的调度中受到的晚点影响比调度员调度稍大, 但是后续列车的晚点时间都有较大的缩减. 本文的模型对运行计划的调整更具灵活性, 前 10 列列车采取延迟发车调度策略, 第 11 列列车采取降速运行调度策略. 对比于总计晚点时间, 调度员

的调度方案共造成 653 min 的列车晚点,在不施加移动闭塞约束条件时,本文模型的调度方案造成了 560 min 的晚点时间,在加入移动闭塞条件后,本文模型的调度方案只造成 521 min 的晚点时间.模型最终的调度方案对比于人工调度缩减了 132 min 的晚点时间,大大地提高了列车的行车效率.

6 结论

本文通过引入事件活动网络的方法研究了列车在遇到地质灾害或设备故障等突发事件后所导致的区间中断下的实时调度问题,提出了基于取消车次、延迟发车和降速运行 3 种调度策略下的优化模型.模型结合列车运动学模型来对列车速度等级进行控制,在充分考虑行车安全的条件下,进一步考虑列车速度约束、安全运行约束以及区间和车站能力等条件来建立混合整数非线性规划模型.与此同时,本文的模型基于移动闭塞原理给予列车灵活的行车最小安全间隔,这样列车在区间中断下更能有效地调度并减少总的延误时间.

模型的验证以京沪铁路的实际运行数据为依据,根据当前铁路局的实际调度管理情况进行.考虑到高速铁路上区间中断的产生具有随机性和不确定性,本文针对不同地点的区间中断设置了 5 个中断持续时间,并将场景设置在不同时段对模型进行验证.验证结果显示,本文所提出的调度模型对减少区间中断带来的晚点时间具有良好的效果.最后,在同样的物理条件下用本模型的解决方案和上海铁路局人工调度案例进行对比,进一步证明了模型的有效性和可靠性.

区间中断下的列车运行调整问题具有复杂性、多样性的特点.本文所研究的区间中断类型目前只针对于持续时间已知的情况,下一步的研究工作考虑将本文的模型拓展到区间中断持续时间未知的情况,对具有不确定性的区间中断建立自适应的列车运行调整模型.此外,本文在模型验证时只考虑了全线运行的长途列车,下一步工作将结合短途列车进行更加深入的研究.最后,随着高速铁路关联程度的提高,基于高速铁路网的调度建模也是一个极具挑战性和现实意义的研究方向.

参考文献

- Higgins A, Kozan E, Ferreira L. Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transport Res Part B-Meth*, 1996, 30: 147–161
- Zhang A M H, Gao Z Y, Ren H L. Incident-based traffic congestion control strategy. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54: 1338–1344 [张敖木翰, 高自友, 任华玲. 突发事件下交通拥堵控制策略. *中国科学: 技术科学*, 2011, 54: 1338–1344]
- Cacchiani V, Huisman D, Kidd M, et al. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transport Res Part B-Meth*, 2014, 63: 15–37
- D'Ariano A, Pranzo M, Hansen I A. Conflict resolution and train speed coordination for solving real-time timetable perturbations. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2007, 8: 208–222
- Dollevoet T, Corman F, D'Ariano A, et al. An iterative optimization framework for delay management and train scheduling. *Flex Serv Manuf J*, 2014, 26: 490–515
- Louwerse I, Huisman D. Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockades. *Eur J Oper Res*, 2014, 235: 583–593
- Zhan S, Kroon L G, Veelenturf L P, et al. Real-time high-speed train rescheduling in case of a complete blockage. *Transport Res Part B-Meth*, 2015, 78: 182–201
- Zhan S G, Zhao J, Peng Q Y, et al. Real-time train rescheduling on high-speed railway under complete segment blockages. *J China Railway Soc*, 2015, 27: 1–9 [占曙光, 赵军, 彭其渊, 等. 高速铁路区间能力全失效条件下列车运行实时调整研究. *铁道学报*, 2015, 27: 1–9]
- Zhan S G, Zhao J, Peng Q Y, et al. Real-time train rescheduling on high-speed railway under partial segment blockages. *J China Railway Soc*, 2016, 38: 1–13 [占曙光, 赵军, 彭其渊, 等. 高速铁路区间能力部分失效情况下列车运行实时调整研究. *铁道学报*, 2016, 38: 1–13]

- 10 Meng L Y, Yang Z X, Li H Y, et al. Train dispatching models under field capacity breakdowns on single-track railway lines. *Syst Eng Theory Practice*, 2012, 32: 885–894 [孟令云, 杨肇夏, 李海鹰, 等. 单线铁路区间能力失效条件下列车运行调整模型. *系统工程理论与实践*, 2012, 32: 885–894]
- 11 Zhan S, Kroon L G, Zhao J, et al. A rolling horizon approach to the high speed train rescheduling problem in case of a partial segment blockage. *Transport Res Part E-Transport Rev*, 2016, 95: 32–61
- 12 Xu P, Corman F, Peng Q, et al. A train rescheduling model integrating speed management during disruptions of high-speed traffic under a quasi-moving block system. *Transport Res Part B-Meth*, 2017, 104: 638–666
- 13 Ning B, Dong H, Gao S, et al. Distributed cooperative control of multiple high-speed trains under a moving block system by nonlinear mapping-based feedback. *Sci China Inf Sci*, 2018, 61: 120202
- 14 Ning B. A number of scientific and technical problems in intelligent transportation. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1264–1269 [宁滨. 智能交通中的若干科学和技术问题. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1264–1269]
- 15 Luan X, Wang Y, de Schutter B, et al. Integration of real-time traffic management and train control for rail networks — Part 1: optimization problems and solution approaches. *Transport Res Part B-Meth*, 2018, 115: 41–71
- 16 Luan X, Wang Y, de Schutter B, et al. Integration of real-time traffic management and train control for rail networks — Part 2: extensions towards energy-efficient train operations. *Transport Res Part B-Meth*, 2018, 115: 72–94
- 17 Gao S G, Dong H R, Ning B. Characteristic model-based all-coefficient adaptive control for automatic train control systems. *Sci China Inf Sci*, 2014, 57: 092201
- 18 Dong H, Zhu H, Li Y, et al. Parallel intelligent systems for integrated high-speed railway operation control and dynamic scheduling. *IEEE Trans Cybern*, 2018, 48: 3381–3389
- 19 Liu M M, Cui C F, Tong X J, et al. Algorithms, softwares and recent developments of mixed integer nonlinear programming. *Sci Sin Math*, 2016, 46: 1–20 [刘明明, 崔春风, 童小娇, 等. 混合整数非线性规划的算法软件及最新进展. *中国科学: 数学*, 2016, 46: 1–20]
- 20 Guo D Q, Lv J D, Wang S L, et al. Formal analysis and verification of Chinese train control system. *Sci Sin Inform*, 2015, 45: 417–438 [郭丹青, 吕继东, 王淑灵, 等. 中国高速铁路列控系统的形式化分析与验证. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45: 417–438]
- 21 Goverde R M P. Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. *Transport Res Part B-Meth*, 2007, 41: 179–201
- 22 Goverde R M P. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transport Res Part C-Emerging Tech*, 2010, 18: 269–287
- 23 Niu H, Zhou X, Gao R. Train scheduling for minimizing passenger waiting time with time-dependent demand and skip-stop patterns: nonlinear integer programming models with linear constraints. *Transport Res Part B-Meth*, 2015, 76: 117–135
- 24 Jiang F, Cacchiani V, Toth P. Train timetabling by skip-stop planning in highly congested lines. *Transport Res Part B-Meth*, 2017, 104: 149–174
- 25 Wang Y, D'Ariano A, Yin J, et al. Passenger demand oriented train scheduling and rolling stock circulation planning for an urban rail transit line. *Transport Res Part B-Meth*, 2018, 118: 193–227
- 26 Burdett R L, Kozan E. Techniques for inserting additional trains into existing timetables. *Transport Res Part B-Meth*, 2009, 43: 821–836
- 27 Cacchiani V, Caprara A, Toth P. Scheduling extra freight trains on railway networks. *Transport Res Part B-Meth*, 2010, 44: 215–231
- 28 Gao Y, Kroon L, Yang L, et al. Three-stage optimization method for the problem of scheduling additional trains on a high-speed rail corridor. *Omega*, 2018, 80: 175–191

Moving block principle-based multi-strategy optimal scheduling method for trains in case of segment blockages

Junjie ZHANG¹, Wenfeng HU^{1,2*}, Tao PENG¹ & Chunhua YANG¹

1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China;

2. The Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China

* Corresponding author. E-mail: wenfenghu@csu.edu.cn

Abstract During the daily operation of high-speed railways, unexpected events such as geological disasters or equipment failure may lead to railway segment blockages. A long-duration segment blockage usually leads to large-scale train delays, which cause significant inconvenience to passengers. Adjusting train schedules in real time during segment blockages is an important issue for the dispatch and operation of high-speed railways. For a segment blockage of a known time interval, a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model for train speed adjustment and train diagram adjustment is constructed. In this model, in addition to the common scheduling strategies involving train cancellation and departure delay, the deceleration strategy is considered. Under the constraints of traffic safety and station capacity, the objective is to minimize the weighted delays of the three strategies. Additionally, the delay time owing to train speed reduction is calculated based on the train kinematic model, and the safe interval of train operation is controlled using the moving block principle. The model established in this paper can be directly simulated using commercial optimization software CPLEX, and the scheduling scheme is guaranteed to be in real time. This paper also discusses the influence of the three adjustment strategies, i.e., train cancellation, departure delay, and deceleration, on the total delay time. Finally, the model is verified using an example of the Beijing-Shanghai high-speed railway. Results show that the model is reasonable and effective. By implementing the model, a reasonable scheduling scheme can be achieved to address practical problems, and the punctuality rate of trains can be improved.

Keywords high-speed train scheduling, segment blockage, real-time operation adjustment, deceleration operation, mixed integer nonlinear programming



Junjie ZHANG was born in 1996. He received his B.S. degree in automation from Northeastern University, Shenyang, in 2018. Currently, he is pursuing his M.E. degree from Central South University, Changsha. His research interests include the dispatching optimization of high-speed railways.



Wenfeng HU was born in 1987. He received his Ph.D. degree in mechanical and biomedical engineering from the City University of Hong Kong, Hong Kong, in 2016. Currently, he is an associate professor at the School of Automation, Central South University, Changsha, China. His research interests include multi-agent systems, networked control systems, and high-speed train control and scheduling.



Tao PENG was born in 1965. She received her Ph.D. degree in control science and engineering from Central South University, Changsha, in 2005. Currently, she is a full professor at the School of Automation, Central South University. Her research interests include fault detection and diagnosis of complex automation control systems.



Chunhua YANG was born in 1965. She received her Ph.D. degree in control science and engineering from Central South University, Changsha, in 2002. Currently, she is a full professor at the School of Automation, Central South University. Her research interests include monitoring and diagnosis of complex industrial processes and intelligent automation control systems.